BRIAN GREENE

ELEGANTNI SVEMIR

Superstrune, skrivene dimenzije i potraga za konačnom teorijom

urednik biblioteke: **Ognjen Strpić**

izdavač: **Naklada Jesenski i Turk**
za izdavača: **Mišo Nejašmić**

preveo: **Goran Vujasinović**
redaktor prijevoda: **dr. Vjera Lopac**

grafički urednik: **Boris Kuk**
tisak: **Stega tisak d.o.o.**, Zagreb

www.jesenski-turk.hr

BRIAN GREENE

ELEGANTNI SVEMIR

SUPERSTRUNE, SKRIVENE DIMENZIJE I POTRAGA

ZA KONAČNOM TEORIJOM

Naklada Jesenski i Turk
Zagreb, travanj 2012.

Brian Greene: *The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*
Copyright © Brian R. Greene 1999, 2003
Copyright za hrvatsko izdanje © Naklada Jesenski i Turk 2011

Mojoj majci i uspomeni na oca,
s ljubavlju i zahvalnošću

Stranice su podijeljene na dvije za lakse citanje na malim citacima.
Treba odabrati Landscape (Horizontalni pogled) za veca slova.
Sadrzaj je na str. 13 a tu su dane i odgovarajuce stranice za citac tj. pdf.

Na racunalu je preglednije citati u kontinuiranom pogledu nego zasebno.
Pdf je pretraživ.

Sadržaj

Predgovor 2003.	9	18
Predgovor	15	30
1. DIO / NA GRANICAMA SPOZNAJE	21	42
Zavezani strunom	23	46
2. DIO / DILEMA O PROSTORU,		

VREMENU I KVANTIMA 45 90
Prostor, vrijeme i oko promatrača 47 94
O uvojima i mreškanju 85 170
Mikroskopska čudnovatost 125 250
Potreba za novom teorijom: 165 330

3. DIO / KOZMIČKA SIMFONIJA 185 370
Čista glazba: osnove teorije superstruna 187 374
"Super" u superstrunama 225 450
Više dimenzija nego što ih oko vidi 247 494
Corpus delicti: eksperimentalni potpisi 277 554

4. DIO / TEORIJA STRUNA I
TKIVO PROSTORVREMENA 299 598
Kvantna geometrija 301 602
Kidanje tkiva prostora 341 682

Onkraj struna: u potrazi za M-teorijom 365 730
Crne rupe: perspektiva teorije struna / M-teorije ..411 822
Razmišljanja o kozmologiji 443 886

5. DIO / UJEDINJENJE U DVADESETPRVOM STOLJEĆU 477 954
Izgledi 479 958

Glosar znanstvenih pojmova 499 998
Kazalo.....515 1030

Predgovor 2003.

Pišući *Elegantni svemir* bio sam svjestan da bi čitateljstvo te knjige moglo biti malobrojno. Napokon, knjigu o izazovima i trijumfima modernog istraživanja najdubljih zakona prirode vjerojatno ne biste ponijeli na plažu niti je čitali u toploj postelji prije spavanja. Činilo se i da bi knjiga o tako apstraktnoj temi, i to s naglaskom na znanosti a ne na ličnostima znanstvenika niti na povijesnim anegdotama, imala još malobrojniju publiku. No to me nije posebno zabrinjavalo

najbrojniju publiku. No to me nije posebno zabrinjavalo jer sam si često (i nedvojbeno s dozom melodramatičnosti) govorio da ako budem imao barem jednog čitatelja, ako mu predstavim nov spektar ideja, nov način razmišljanja o sebi i svom mjestu u univerzumu, to će mi biti dovoljno. Bilo da je to mlad student koji pokušava odlučiti što će specijalizirati, zaposleni profesionalac koji traži nešto izvan svakodnevne rutine ili umirovljenik koji je napokon pronašao vremena za čitanje o razvoju znanosti, ako im uspijem pokazati nov put prema univerzumu kako ga vidi moderna fizika, trud uložen u pisanje *Elegantnog svemira* neće biti uzaludan. Ta pomisao pomogla mi je u krizama koje mnogi autori proživljavaju usred važnog projekta.

Neprekidno me je ohrabrivala i publika koja je pohađala razna predavanja za laike koje sam držao o teoriji relativnosti, kvantnoj mehanici i o svojoj specijalnosti – teoriji superstruna – publika koja se divila neobičnim i začudnim mislima koje nastaju u avangardnim istraživanjima. Svemir

u kojem se prostor i vrijeme mogu oblikovati, svemir s više dimenzija nego što ih vidimo, svemir u kojemu se tkivo prostora može pocijepati, svemir u kojemu se možda sve sastoji od titraja ultramikroskopskih petlji energije koje nazivamo superstrunama – taj svemir uzbuđivao je ljude i mnogi su ga željeli bolje razumjeti. *Elegantni svemir* izrastao je iz tih predavanja, jer sam htio napisati knjigu za čitatelje bez formalnog poznavanja matematike i fizike. Iako ga je književni agent kojemu sam svoj prijedlog prvome ponudio bez razmišljanja odbio – vjerojatno ocijenivši da je tema odviše specijalizirana da bi privukla nekog velikog izdavača – na svojim predavanjima osjećao sam jak entuzijazam za znanost. Bio je gotovo opipljiv.

Elegantni svemir oslonio se na taj entuzijazam, a izvrsne reakcije na koje je naišao svjedoče o urođenom nagonu mnogih od nas da predano i hrabro istražuju ovo što nazivamo svojim svijetom. Osim toga, potvrdio je moje vjerovanje da fizika autoru nudi čudesno maštovitu građu. Svi volimo

da fizika autora nudi čudesno raskošnu građu. Svi volimo dobru priču. Svi volimo zagonetke. Svi volimo autsajdera koji ne odustaje usprkos naizgled nepremostivim preprekama. Svi mi, u ovom ili onom obliku, pokušavamo pronaći smisao u svijetu oko sebe. A svi ti elementi skrivaju se u srži moderne fizike. Ta priča je epska – događanja u cijelom svemiru; zagonetka je jedna od najtežih – kako je nastao svemir; prepreke su gotovo nesavladive: dvonošci, novopridošlice u svemirskim razmjerima, pokušavaju otkriti vječne tajne; a potraga je jedna od najdubljih – istraživanje fundamentalnih zakona koji objašnjavaju sve što vidimo, i više od toga, od najsitnijih čestica do najudaljenijih galaksija. Teško je i zamisliti bogatiju građu.

Neznanstvenici katkad ne razlikuju jezik koji ih zastrašuje – matematiku, jezik na kojem se razvija fizika – od zadivljujućih ideja kojima se poigrava. No to bi bilo kao da ja pokušavam pročitati *Huckleberry Finna* na grčkom. Iako se neprekidno služim grčkom abecedom, ne govorim ni riječ

tog jezika i zato bi moj dojam o tom romanu bio, blago rečeno, umanjen. Slično tome, kad spustimo matematičke prepreke i pojmove moderne fizike izrazimo svima poznatim jezikom, kako bi ih upoznali i razmišljali o njima, mnogi od onih koji su mislili da ih znanost ne zanima ostanu bez daha. Kad se teme moderne fizike ekstrahira iz njihova stručnog jezika, pokazuje se da su one doslovno univerzalne.

To je sve jasnije u posljednje vrijeme, jer je fizika sve prisutnija u kulturi – sve veći broj kazališnih, glazbenih i likovnih djela nadahnjuje se modernom znanošću. Znam za barem desetak novijih drama, jedan gudački kvartet, mnogo filmova i drama, jednu operu, niz slika i kipova koji u određenoj mjeri izražavaju, tumače i proširuju ljudsku dramu koju predstavlja put znanosti. Premda je to doista čudesno, to me ne iznenađuje. Uvijek me je oduševljavala umjetnost i književnost koja dobro protrese moj dojam o tome što je uistinu zbiljsko i važno, a mnogi dijele to moje gledište. A upravo to čine i dalekosežna dostignuća u fizici u

posljednjih stotinu godina. Nije pretjerano reći da su teorija relativnosti i kvantna mehanika iz korijena promijenile pravila stvarnosti, a teorija superstruna danas ih iznova korigira. Nije nikakvo čudo da slikari, pisci, skladatelji i filmski stvaraoci pronalaze sličnosti između svoga rada i tih znanstvenih izazova statusu quo.

No to nije jednosmjerna ulica. Integriranje otkrića fizike u naš kolektivni svjetonazor polagan je proces. Još i danas, nakon stotinu godina, većina ljudi još ne cijeni eksperimentima potvrđene lekcije koje nam je održao Einstein, a ni pouke kvantne mehanike. Prilazeći znanosti bez straha, i služeći se sebi svojstvenom snagom fascinacije u stvaranju zabavnih i dramatičnih djela, umjetnost je možda savršeno sredstvo za punu integraciju znanosti u razgovore o svijetu. Možda ćemo doživjeti čak i da znanošću nadahnuta djela svijeta umjetnosti ponude nove poticaje znanstvenoj imaginaciji, a na neki neopipljiv način možda će nas i pripre-

miti za sljedeći korak u razumijevanju svemira. Promjenom jarkog svjetla koje obasjava znanosti iz strogog, brojčanog i kognitivnog u blaži, prozračniji sjaj ljudske senzibilnosti, otvaraju se silne mogućnosti. Kad se znanost napokon shvati kao integralan dio svega što nas čini ljudima, naša povezanost s univerzumom bit će znatno jača; doista, znanost je nit koja nas sve povezuje s tkivom stvarnosti.

Što se tiče razvoja teorije superstruna, godine nakon prvog objavljivanja *Elegantnog svemira* bile su iznimno plodne, ali tek treba doći do revolucije u mišljenju, o kojoj mnogi naslućuju da vreba na nas iza ugla. To ima i dobre i loše posljedice. S pozitivne strane, ništa u ovom tekstu nije zastarjelo niti je postalo nevažno. Kad bih danas pisao knjigu o teoriji struna, obradio bih sve što sam iznio i ovdje, možda bih tu i tamo promijenio naglasak, ali konačan tekst uglavnom se ne bi razlikovao od *Elegantnog svemira*. Dodao bih poglavlje o zanimljivim novim idejama koje naznačuju da su strune i dodatne prostorne dimenzije nešto veće nego

da su strune i dodatne prostorne dimenzije nešto veće nego što se obično misli (mogućnost koja se u vrijeme pisanja tek razvijala; ukratko smo je razmotrili u brojnim bilješkama), i raspravu o ingenioznim radovima koji istražuju egzaktniju (takozvanu neperturbativnu) formulaciju teorije struna. Dakle, kad budete čitali poglavlja 6, 8 i 12, imajte na umu da strune i dodatne dimenzije možda nisu tako malene kao što ih opisujem, te da je postignut značajan uspjeh u iznalaženju egzaktnih jednadžbi teorije struna (iako fizičari zasad nisu uspjeli primijeniti te jednadžbe u rješavanju glavnih pitanja postavljenih u tim poglavljima).

Negativna strana toga što tekstu ove knjige nije potrebna revizija u tome je što mnoge u njoj opisane prepreke još nisu svladane. Iskreno rečeno, iako bismo svi željeli da napredak bude brz i žestok, taj ritam upravo je primjeren. Teorija superstruna bavi se najdubljim problemima teorijske fizike, od kojih su mnogi izvan dosega eksperimentalne provjere. Korist od konačnog uspjeha bit će golema, jer će neka od

najdubljih pitanja o univerzumu dobiti odgovor. Ali za napredak je potrebno marljivo raditi, imati strpljenja, sreće, a i mnogo nadahnuća – a ništa od toga ne može se predvidjeti ni kontrolirati. Možda ćemo željenu razinu spoznaje ostvariti u ovoj generaciji, a možda nećemo.

Možda će to doživjeti tek daleki naraštaji. Zasad možemo sa sigurnošću reći samo da to nećemo znati ako ne pokušamo. Sudeći po sve nadarenijim studentima koji se posvećuju tom području, imat ćemo mnogo predanih istraživača spremnih da uzmu baklju i upute se trnovitim putem. U sljedećim desetljećima svesrdno ćemo pokušavati rasvijetliti tajne univerzuma.

Predgovor

Albert Einstein je posljednjih trideset godina svoga života neumorno pokušavao pronaći takozvanu teoriju ujedinjenog polja – teoriju kadru da opiše prirodne sile jednim, sveobuhvatnim, koherentnim okvirom. Einsteina nije motiviralo ono što obično povezujemo sa znanstvenim pothvatima, kao što je pokušaj da se objasni ovaj ili onaj podatak dobiven eksperimentom. Njega je vodila strastvena vjera da ćemo najdubljim razumijevanjem univerzuma otkriti njego-

vo najveće čudo: jednostavnost i moć načela na kojima se on temelji. Einstein je želio iznijeti na svjetlo dana mehanizam univerzuma s nikad prije postignutom jasnoćom, što bi nam omogućilo da se divimo njegovoj čistoj ljepoti i eleganciji.

Einstein nije ostvario taj san, velikim dijelom zato što je imao loše karte: velik broj bitnih svojstava materije i prirodnih sila u njegovo doba bio je još nepoznat ili u najboljem slučaju pogrešno shvaćen. Ali posljednjih pedesetak godina fizičari su u svakom novom naraštaju – uz mnogo zastoja i skretanja u slijepe ulice – postojano gradili na temeljima otkrića svojih prethodnika kako bi složili potpuniju sliku o mehanizmu univerzuma. A sada, dugo nakon što je Einstein artikulirao svoju potragu za ujedinjenom teorijom, ali je ostao praznih ruku, fizičari vjeruju da su napokon pronašli okvir u koji se može postaviti te spoznaje tako da čine savršenu cjelinu – jednu teoriju koja je u načelu kadra opisati sve pojave. Ta teorija, teorija superstruna, tema je ove knjige.

Elegantni svemir napisao sam u pokušaju da dojmljive spoznaje koje nastaju u avangardnoj fizici postanu dostupne širokom spektru čitatelja, posebno onima koji nisu učili matematiku ni fiziku. Na javnim predavanjima o teoriji superstruna koja držim već nekoliko godina, svjedočio sam želji mnogih da razumiju što nam nova istraživanja govore o fundamentalnim zakonima univerzuma, na koji način ti zakoni zahtijevaju temeljitu rekonstrukciju našeg shvaćanja univerzuma, i kakvi nas izazovi čekaju u trajnoj potrazi za konačnom teorijom. Nadam se da će ova knjiga, objasnivši velika dostignuća fizike, sve od Einsteina i Heisenberga, i opisavši uspjeh tih otkrića u kontekstu velikih promjena našega doba, obogatiti i zadovoljiti tu radoznalost.

Također se nadam da će *Elegantni svemir* zanimati i čitatelje koji imaju određeno znanstveno obrazovanje. Za studente i predavače fizike, nadam se da će ova knjiga kristalizirati neke osnovne stvari o modernoj fizici, kao što su specijalna teorija relativnosti, opća teorija relativnosti i

kvantna mehanika, prenoseći zarazno uzbuđenje istraživača koji se približavaju dugo traženoj ujedinjenoj teoriji. Za ljubitelje popularne znanosti pokušao sam objasniti mnoge zadivljujuće napretke u našem razumijevanju svemira do kojih je došlo u proteklom desetljeću. A što se tiče mojih kolega u drugim znanstvenim strukama, nadam se da će im ova knjiga pružiti iskren i uravnotežen dojam o tome zašto su teoretičari struna tako zaneseni napretkom ostvarenim u potrazi za konačnom teorijom prirode.

Teorija superstruna baca široku mrežu. To je široka i duboka tema koja uključuje mnoga važna otkrića u fizici. Budući da ta teorija ujedinjuje zakone na velikoj i malenoj skali, zakone koji vladaju fizikom i u najdaljim svemirskim prostranstvima i u najsitnijim mrvicama tvari, toj se temi može pristupiti iz mnogo smjerova. Odlučio sam se usredotočiti na naše razumijevanje prostora i vremena, koje se neprekidno razvija. Smatram da je to posebno zanimljiv ra-

zvojni put, koji utire bogatu i fascinantnu stazu kroz bitno nove spoznaje. Einstein je pokazao svijetu da se prostor i vrijeme ponašaju na začudan način. Danas su avangardna istraživanja integrirala njegova otkrića u kvantni univerzum s mnoštvom skrivenih dimenzija, skutrenih u tkivu univerzuma – dimenzija u čijoj se bogatoj i zamršenoj geometriji možda krije ključ za neka od najdubljih ikad postavljenih pitanja. Iako su neki od tih pojmova teško shvatljivi, vidjet ćemo da im se može približiti praktičnim analogijama. A kada shvatimo te zamisli, one će nam ponuditi čudesnu, revolucionarnu perspektivu na univerzum.

U cijeloj knjizi trudio sam se ne udaljiti se od znanosti a ipak pružiti čitatelju intuitivno razumijevanje – često preko analogija i metafora – kako su znanstvenici došli do današnjeg shvaćanja univerzuma. Iako izbjegavam stručni jezik i jednadžbe, zbog radikalno novih pojmova o kojima je riječ, čitatelj će možda poželjeti zastati, zamisliti se nad ponekim

odlomkom ili objašnjenjem, kako bi uspijevao pratiti razvoj ideja. Neki odjeljci u 4. dijelu (koji se odnosi na najnovije teorije) ponešto su apstraktniji od ostalih; potrudio sam se unaprijed upozoriti čitatelja na te odjeljke i strukturirati tekst tako da ih se može preletjeti ili preskočiti uz minimalne posljedice po logički tok knjige. Dodao sam glosar znanstvenih pojmova kao lak i pristupačan podsjetnik na ideje objašnjene u glavnom tekstu. Premda će opušteniji čitatelji poželjeti preskočiti bilješke, marljiviji među njima u naći će potkrepu tvrdnji iznesenih u tekstu, kao i nekoliko stručnih ekskursa za matematički nadarene.

Mnogim ljudima dugujem zahvalnost na pomoći tijekom pisanja ove knjige. David Steinhardt pročitao je rukopis s velikom pomnjom i velikodušno ponudio oštroumne uredničke intervencije i poticaje od neprocjenjive vrijednosti. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicholas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits i Shani Offen pažljivo su pročitali rukopis

i iznijeli detaljne reakcije i prijedloge koji su u velikoj mjeri poboljšali izlaganje. Među ostalima koji su pročitali cijeli rukopis ili njegove dijelove su Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Greene, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa i Gabriele Veneziano. Posebnu zahvalnost dugujem Raphaelu Gunneru zato što me je, između ostaloga, strogo kritizirao u prvim fazama pisanja i tako mi pomogao da oblikujem opći ton knjige, i Robertu Malleyju na njegovim blagim, ali upornim poticajima da prestanem samo razmišljati o knjizi i "stavim olovku na papir". Steven Weinberg i Sidney Coleman bili su izvor vrijednih savjeta i podrške, a zadovoljstvo mi je priznati da su mi mnogim korisnim podacima pomogli Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Wendy Greene, Susan Gree-

ne, Erik Jendresen, Gary Kass, Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Moorehouse, Pierre Ramond, Amanda Salles i Eero Simoncelli. Costas Efthimiou zadužio me je time što mi je pomogao pri provjeravanju činjenica i pronalaženju referenci, te time što je moje početne žvrljotine pretvorio u skice na temelju kojih je Tom Rockwell – strpljivošću sveca i besprijekornim umjetničkim okom – stvorio crteže koji ilustriraju tekst. Zahvaljujem i Andrewu Hansonu i Jinu Sethni na pomoći u pripremi nekoliko specijaliziranih crteža.

Konzultacije i osobnu perspektivu o raznim temama pružili su mi Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten te, još jedanput, Andrew Strominger, Cumrun Vafa i Gabriele Veneziano.

Na velikodušnoj potpori mojim istraživanjima teorijske fizike tijekom više od petnaest godina zahvaljujem National Science Foundation, Alfred P. Sloan Foundation i U. S.

Department of Energy. Vjerojatno nije slučajno što se moje istraživanje usredotočilo na utjecaj koji teorija superstruna ima na naše poimanje prostora i vremena, pa u dva kasnija poglavlja opisujem neka otkrića u kojima sam imao sreće sudjelovati. Iako se nadam da će čitatelj uživati čitajući te "insajderske" priče, shvaćam da će one možda ostaviti pretjeran dojam o mojoj ulozi u razvoju teorije superstruna. Zato koristim ovu priliku da priznam kako više od tisuću fizičara diljem svijeta predano sudjeluje u naporu da se oblikuje konačna teorija univerzuma. Ispričavam se svima onima koje nisam uključio u ovaj prikaz; to je samo odraz tematske perspektive koju sam odabrao i ograničenog prostora ovoga općeg izlaganja.

Na kraju, srdačno zahvaljujem Ellen Archer na nepokolebljivoj ljubavi i podršci, bez koje ova knjiga nikad ne bi bila napisana.

1. DIO

NA GRANICAMA SPOZNAJE

PRVO POGLAVLJE

Zavezani strunom

Bilo bi odviše dramatično nazvati to prikrivanjem, ali više od pola stoljeća – usprkos nekima od najvećih znanstvenih dostignuća u povijesti – fizičari su prešutno svjesni oblaka koji zamračuju daleki obzor. Problem je ovaj: moderna fizika počiva na tri kamena temeljca. Prvi je opća teorija relativnosti Alberta Einsteina, koja nudi teorijski okvir za razumi-

jevanje univerzuma u najvećim razmjerima: zvijezda, galaksija, grozdova galaksija i golemog svemirskog prostranstva onkraj njih. Drugi je kvantna mehanika, koja pruža teorijski okvir za razumijevanje univerzuma u najmanjim razmjerima: molekula, atoma, sve do subatomskih čestica kao što su elektroni i kvarkovi. Kroz duge godine istraživanja fizičari su eksperimentalno potvrdili, do gotovo nezamislive preciznosti, gotovo sva predviđanja svih tih teorija. No isti ti teorijski alati neizbježno vode do sljedećeg uznemirujućeg zaključka: u svojim današnjim formulacijama, opća teorija relativnosti i kvantna mehanika ne mogu obje biti ispravne. Te dvije teorije, koje su u osnovi golemog napretka fizike proteklih stotinu godina – napretka koji je objasnio širenje svemira i fundamentalnu strukturu materije – međusobno su neuskladive. Ako još niste čuli za taj nepomirljiv sukob, možda se pitate zašto niste. Na to nije teško odgovoriti. U svim situacijama osim najekstremnijih, fizičari proučavaju ono što je ili maleno i lagano (kao što su atomi i njihove

sastavnice) ili ono što je golemo i teško (kao što su zvijezde i galaksije), ali ne i jedno i drugo u isto vrijeme. To znači da se služe ili samo kvantnom mehanikom ili samo općom teorijom relativnosti, pa se mogu samo bez riječi osvrnuti i slegnuti ramenima na ljutite primjedbe iz drugog tabora. Taj pristup već pedeset godina nije baš jednak blaženom neznanju, ali nije ni daleko od njega.

Ali, univerzum doista može biti ekstreman. U dubini središta crne rupe golema masa stisnuta je do minijaturne veličine. U trenutku velikog praska cijeli univerzum erumpirao je iz mikroskopskog grumenčića, tako malenog da je zrno pijeska u odnosu na njega pravi gorostas. Stoga je na tim područjima, sićušnim, ali ipak nevjerojatno masivnim, potrebno istodobno primijeniti i kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti. Kao što će postajati sve jasnije u ovoj knjizi, kada kombiniramo jednadžbe opće teorije relativnosti s onima kvantne mehanike, one počinju škripati, podrhtavati i puštati paru poput automobila kojem je zakuhao hladnjak.

Rečeno manje figurativno, u tom nesretnom spoju tih dviju teorija, ispravno postavljena fizikalna pitanja daju besmislene odgovore. Čak i ako smo spremni na to da duboka unutrašnjost crne rupe i pitanje početka univerzuma ostanu zaogrnuti velom tajne, ne možemo se oteti dojmu da sukob kvantne mehanike i opće teorije relativnosti poziva na dublje razumijevanje. Zar je doista moguće da je univerzum na fundamentalnoj razini podijeljen i zahtijeva jedan sklop zakona za velike stvari, a drugi, neuskladiv sklop zakona kad su stvari malene?

Teorija superstruna, pravi skorojević u usporedbi s časnim starinama kvantne mehanike i opće teorije relativnosti, odlučno odgovara da to nije moguće. Intenzivna istraživanja fizičara i matematičara proteklih deset godina otkrila su da taj novi pristup opisivanju prirode na najdubljoj razini razrješava napetost između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. U tom okviru, opća teorija relativnosti

i kvantna mehanika zahtijevaju jedna drugu da bi teorija imala smisla. Prema teoriji superstruna, brak između zakona velikoga i malenoga nije samo sretan nego i neizbježan.

To je dobra vijest. No teorija superstruna – skraćeno, teorija struna – postavlja to jedinstvo na još višu razinu. Einstein je tri desetljeća tražio ujedinjenu teoriju fizike koja bi ispreplela sve prirodne sile i materijalne sastavnice u jednoj teorijskoj tapiseriji. Nije uspio. Danas, u osvit novog tisućljeća, zastupnici teorije struna tvrde da su niti te tapiserije napokon otkrivene. Teorija struna ima potencijal da pokaže kako su svi čudesni događaji u univerzumu – od grozničavog plesa subatomskih kvarkova to dostojanstvenog valcera binarnih zvijezda, od primordijalnog ognja do veličanstvenih spirala nebeskih galaksija – odraz jednog velikog fizikalnog načela, jedne važne jednadžbe.

Budući da ta svojstva teorije struna zahtijevaju da drastično promijenimo svoje razumijevanje prostora, vremena i materije, trebat ćemo neko vrijeme da se naviknemo na

njih, da ih usvojimo tako da nam barem ne smetaju. Ali, kao što će postati jasno, kad se teoriju struna sagleda u pravom kontekstu, ona postaje dramatičan, ali prirodan razvoj revolucionarnih otkrića u fizici iz proteklih stotinu godina. Štoviše, vidjet ćemo da sukob između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike zapravo nije prvi, nego treći u nizu temeljnih sukoba u proteklom stoljeću, a sva njihova rješenja dovela su do zapanjujuće promjene našeg razumijevanja univerzuma.

Tri sukoba

Prvi sukob, prepoznat još krajem devetnaestog stoljeća, odnosio se na zagonetna svojstva gibanja svjetlosti. Ukratko, prema zakonima gibanja Isaaca Newtona, ako trčite dovoljno brzo, moći ćete dostići odlazeću zraku svjetlosti, dok pre-

ma zakonima elektromagnetizma Jamesa Clerka Maxwella, nećete to moći. Kao što ćemo raspraviti u poglavlju 2, Einstein je razriješio taj sukob svojom specijalnom teorijom relativnosti, i tako postavio naglavce naše razumijevanje prostora i vremena. Prema specijalnoj relativnosti, prostor i vrijeme više ne možemo shvaćati kao univerzalne pojmove, u kamen uklesane, koje svi mi jednako doživljavamo. Umjesto toga, prostor i vrijeme pojavili su se u Einsteinovoj obradi kao podatni konstrukti čiji oblik i pojava ovise o stanju promatračeva gibanja.

Razvoj specijalne relativnosti odmah je postavio pozornicu za drugi sukob. Jedan od zaključaka Einsteinova djela glasi da nijedan predmet – štoviše, nikakav utjecaj ni poremećaj – ne može putovati brže od svjetlosti. No, kao što ćemo raspraviti u poglavlju 3, Newtonova empirijski uspješna i intuitivno zadovoljavajuća opća teorija gravitacije uključuje utjecaje koji se trenutno prenose preko velikih prostranstava. Tad je nastupio Einstein (opet on) i riješio

spor ponudivši novo poimanje gravitacije svojom općom teorijom relativnosti iz 1915. Kao što je specijalna relativnost oborila prethodne pojmove prostora i vremena, to je ponovila i opća relativnost. Ne samo da gibanje promatrača utječe na prostor i vrijeme, nego se oni mogu i iskriviti i uviti u prisutnosti materije ili energije. Vidjet ćemo da ta iskrivljenja tkiva prostora i vremena prenose gravitacijsku silu s jednog mjesta na drugo. Dakle, prostor i vrijeme više ne možemo shvaćati kao inertnu pozadinu na kojoj se odvijaju događaji univerzuma; umjesto toga, u specijalnoj, a potom i općoj relativnosti, oni imaju povezane uloge u samim tim događajima.

A tada se ponovilo: otkriće opće relativnosti riješilo je jedan spor, a izazvalo drugi. Prva tri desetljeća dvadesetog stoljeća fizičari su razvijali kvantnu mehaniku (o kojoj raspravljamo u poglavlju 4) kao reakciju na određen broj teških problema koji su nastali kad se pojmove fizike devetnae-

stog stoljeća primijenilo na mikroskopski svijet. Kao što smo spomenuli, treći i najdublji sukob nastao je iz nesukladnosti kvantne mehanike s općom relativnošću. Kako ćemo vidjeti u poglavlju 5, blago zakrivljen geometrijski oblik prostora koji je nastao u općoj relativnosti ne uklapa se u grozničavo, uzavrelo mikroskopsko gibanje univerzuma koje implicira kvantna mehanika. Budući da je teorija struna tek sredinom 1980-ih ponudila rješenje, taj sukob se s pravom naziva glavnim problemom moderne fizike. Štoviše, većina nas uzima zdravo za gotovo da naš univerzum ima tri prostorne dimenzije. No, prema teoriji struna, to nije tako, jer ona tvrdi da naš univerzum ima mnogo više dimenzija nego što ih oko vidi – dimenzija koje su čvrsto uvijene u nabrano tkivo svemira. Ti zadivljujući uvidi u prirodu prostora i vremena tako su važni da će biti vodeća tema u izlaganjima. Teorija struna, u stvarnom smislu, priča je o prostoru i vremenu nakon Einsteina.

Da bismo shvatili što teorija struna doista jest, moramo

se osvrnuti i ukratko opisati što smo u posljednjem stoljeću naučili o mikroskopskoj strukturi univerzuma.

Univerzum u najmanjim razmjerima: što znamo o materiji

Drevni Grci naslućivali su da se tkivo univerzuma sastoji od sićušnih "nedjeljivih" sastojaka koje su nazvali atomima. Kao što se od obilja kombinacija malog broja slova abecede tvori golem broj riječi, Grci su pretpostavili da bi i širok raspon materijalnih predmeta mogao biti rezultat kombinacija malenog broja posebnih, elementarnih blokova. Pretpostavka je bila točna. Više od 2000 godina potom još vjerujemo da je to istina, iako je identitet fundamentalnih jedinica pretrpio brojne izmjene. U devetnaestom stoljeću znanstvenici su dokazali da mnoge poznate tvari, poput ugljika i kisi-

ka, imaju najmanji prepoznatljiv sastojak; slijedeći tradiciju drevnih Grka, nazvali su ih atomima. Taj naziv se zadržao, ali povijest je pokazala da je pogrešan, jer su atomi itekako "djeljivi". Početkom 1930-ih kolektivan rad J. J. Thomsona, Ernesta Rutherforda, Nielsa Bohra i Jamesa Chadwicka uspostavio je model atoma nalik na Sunčev sustav, koji većinom dobro poznajemo. Daleko od toga da su elementarne sastavnice materije, atomi se sastoje od jezgre, koja sadrži protone i neutrone, a okružuje ju roj elektrona u orbitama.

Neko vrijeme su mnogi fizičari mislili da su protoni, neutroni i elektroni grčki "atomi". No, 1968. su eksperimentatori u stanfordskom Centru za linearne akceleratore, služeći se povećanim tehnološkim mogućnostima za prodor u mikroskopske dubine tvari, otkrili da ni protoni ni neutroni nisu fundamentalni. Umjesto toga, dokazali su da se oni sastoje od tri manje čestice, nazvane *kvarkovi* – nadahnut odlomkom iz *Finneganova bdijenja* Jamesa Joycea, to duhovito ime nadjenuo im je teorijski fizičar Murray Gell-Mann,

koji je još prije naslućivao da postoje. Eksperimentatori su potvrdili da se kvarkovi dijele na dvije vrste, koje su dobile nešto manje kreativna imena: *gornji* i *donji*. Proton se sastoji od dva gornja kvarka i jednog donjeg, a neutron od dva donja i jednog gornjeg.

Sve što vidite na zemlji i na nebu načinjeno je od kombinacija elektrona, gornjih kvarkova i donjih kvarkova. Nijedan eksperimentalni podatak ne naznačuje da bi se neka od te tri čestice sastojala od nečega manjega. No, mnoštvo dokaza upućuje na to da univerzum ima i dodatne čestične sastojke. Sredinom 1950-ih Frederick Reines i Clyde Cowan eksperimentima se pronašli nesporne dokaze o četvrtoj fundamentalnoj čestici, nazvanoj *neutrino* – čestici koju je početkom 1930-ih predvidio Wolfgang Pauli. Pokazalo se da je neutrine teško pronaći jer su to čestice-duhovi koje rijetko stupaju u interakcije s drugom materijom: neutrino prosječne energije lako može proći kroz mnogo bilijuna kilometara

olova a da to uopće ne utječe na njegovo gibanje. Sad biste trebali odahnuti, jer upravo sada, dok ovo čitate, kroz vaše tijelo i kroz Zemlju prolaze milijarde neutrina koje je na početku njihova usamljenog puta kroz svemir izbacilo Sunce. Krajem 1930-ih, fizičari koji su proučavali kozmičke zrake (snopove čestica koji bombardiraju Zemlju iz svemira), otkrili su drugu česticu, nazvanu *mion* – istovjetnu elektronu, osim što je mion oko 200 puta teži. Budući da u kozmičkom poretku nije bilo ničega što bi zahtijevalo postojanje miona – nikakve neriješene zagonetke, nikakve prikladne niše – fizičar čestica i nobelovac Isidor Isaac Rabi nije baš dobrodošlicom pozdravio otkriće miona: "Ma tko je to naredio?" – rekao je. No ipak, mion je bio tu. A to je bio tek početak.

Služeći se sve moćnijom tehnologijom, fizičari su i dalje sudarali komadiće tvari, sve većom energijom, na trenutak stvarajući uvjete neviđene nakon velikog praska. U krhotinama nastalim nakon sudara tražili su nove fundamentalne sastojke i dodavali ih sve duljem popisu čestica. Evo što su

pronašli: još četiri kvarka: *začarani*, *čudni*, *dubinski* i *vršni*, te još jednog, još težeg rođaka elektrona, nazvanog *tau*, kao i dvije druge čestice sa svojstvima sličnima neutrinu (nazvane su *mionski neutrino* i *tauonski neutrino* kako bi ih se razlikovalo od originalnog neutrina, koji sada nosi ime *elektronski neutrino*). Te čestice nastaju visokoenergijskim sudarima i postoje tek na trenutak; one nisu sastojci ničega na što obično nailazimo. No čak ni to nije kraj cijele priče. Sve te čestice imaju partnersku *antičesticu* – česticu identične mase ali suprotnu u nekim drugim aspektima, kao što je električni naboj (a i naboji drugih sila, koje ćemo razmotriti u daljnjem tekstu). Na primjer, elektronova antičestica zove se *pozitron* – ima posve jednaku masu kao i elektron, ali njegov električni naboj je +1, dok je električni naboj elektrona -1. Kad se dotaknu, materija i antimaterija mogu se poništiti i tako stvoriti čistu energiju – zato u svijetu oko nas ima iznimno malo antimaterije koja se prirodno pojavljuje.

Fizičari su uočili pravilnost u tim česticama, prikazanu u tablici 1.1. Materijalne čestice uredno su razvrstane na tri skupine, koje se često naziva porodicama. Svaka porodica sadrži dva kvarka, jedan elektron ili nekog njegova rođaka, i jednu vrstu neutrina. Komplementarne vrste čestica u trima porodicama imaju ista svojstva, osim mase, koja je u svakoj porodici sve veća. To znači da su fizičari dosad istražili strukturu materije do razmjera od milijardinke milijardinke metra i dokazali da se sve na što smo dosad naišli – bilo da se pojavljuje prirodno ili je nastalo umjetno u velikim razbijačima atoma – sastoji od neke kombinacije čestica iz tih triju porodica i od njihovih antimaterijalnih partnera.

Porodica 1	**Porodica 2**	**Porodica 3**
Čestica Masa	*Čestica Masa*	*Čestica Masa*
elektron 0,00054	mion 0,11	tau 1,9
elektronski neutrino <10-8	mionski neutrino <0,0003	tauonski neutrino <0,033

gornji kvark 0,0047	začarani kvark 1,6	vršni kvark 189
donji kvark 0,0074	čudni kvark 0,16	dubinski kvark 5,2

Tablica 1.1 Tri porodice fundamentalnih čestica i njihove mase (kao višekratnici mase protona). Vrijednosti mase neutrina zasad se odupiru eksperimentalnom određenju.

Pogled na Tablicu 1.1 zasigurno će vam ostaviti još jači dojam zadivljenosti nego što ga je osjetio Rabi kad je otkrio mion. Raspored po porodicama daje barem neki dojam reda, ali odmah se nameću nebrojena pitanja. Zašto postoji toliko mnogo fundamentalnih čestica, posebno s obzirom na to da se čini kako su za veliku većinu stvari u svijetu potrebni samo elektroni, gornji kvarkovi i donji kvarkovi? Zašto postoje tri porodice? Zašto ne jedna porodica, ili četiri, ili bilo koji drugi broj? Zašto čestice imaju naizgled nasumične vrijednosti mase – zašto, na primjer, tau teži oko 3520 puta više od elektrona? Zašto vršni kvark teži oko 40 200 puta više nego gornji kvark? To su tako neobični, naizgled na-

sumični brojevi. Jesu li nastali slučajno, nekom božanskom odlukom, ili ipak postoji razumljivo znanstveno objašnjenje tih temeljnih svojstava našega univerzuma?

Sile: ili, gdje je taj foton?

Stvari postaju zamršenije kad razmotrimo prirodne sile. Svijet oko nas prožet je time da netko ili nešto utječe na nešto drugo: loptu možete udariti palicom, zanesenjaci za *bungee-jumping* bacaju se s visokih platformi, magneti drže superbrze vlakove tik iznad metalnih tračnica, Geigerov brojač pucketajući reagira na radioaktivne tvari, nuklearne bombe katkad eksplodiraju. Na predmete možemo utjecati tako da ih snažno gurnemo, povučemo ili protresemo; ili tako da ih zamrznemo, zagrijemo ili spalimo. Proteklih stotinu godina fizičari prikupljaju sve više dokaza da se sve te interakcije između raznih predmeta i materijala, kao i svih milijuna i

milijuna drugih koje svakodnevno susrećemo mogu svesti na kombinacije četiriju fundamentalnih sila. Jedna od njih je *gravitacijska sila*. Ostale tri su *elektromagnetska sila*, *slaba sila* i *jaka sila*.

Gravitacija je najpoznatija od tih sila i odgovorna je za to da nas drži u orbiti oko Sunca, a zbog nje i hodamo s nogama po Zemlji. Masa predmeta je mjera toga koliko jakom gravitacijskom silom taj predmet može djelovati, ali je istodobno i trpjeti. Sljedeća poznata sila je elektromagnetska. Ona pokreće sve ugodnosti modernoga života – svjetiljke, računala, televizore, telefone – a u osnovi je i goleme moći munje i nježnoga dodira ljudske ruke. Mikroskopski gledano, električni naboj čestice igra istu ulogu u elektromagnetskoj sili koju masa igra u gravitaciji: određuje koliko jaku elektromagnetsku silu ta čestica može proizvesti i, a u isti mah je i trpjeti.

Jaka i slaba sila manje su poznate jer se njihova jakost brzo smanjuje na svim udaljenostima osim onih u subatom-

skim razmjerima; to su nuklearne sile. Zato su te dvije sile otkrivene tek nedavno. Jaka sila odgovorna je za to da drži kvarkove "slijepljene" zajedno unutar protona i neutrona te da drži protone i neutrone tijesno nagurane u atomskoj jezgri. Slaba sila je pak najpoznatija po tome što upravlja radioaktivnim raspadom tvari kao što su uranij i kobalt.

U prošlom stoljeću fizičari su otkrili dva svojstva koja su zajednička svim tim silama. Prvo, o čemu ćemo raspravljati u poglavlju 5, na mikroskopskoj razini sve te sile imaju pridruženu česticu koju možemo smatrati najmanjim paketom ili "smotuljkom" sile. Ako ispalite lasersku zraku – "elektromagnetski pištolj" – ispalit ćete struju fotona, najmanjih paketića elektromagnetske sile. Slično tome, najmanje sastavnice polja sila slabe i jake sile su čestice koje nazivamo *slabim baždarnim bozonima* i *gluonima*. (Ime *gluon* osobito je deskriptivno: gluone možete zamisliti kao mikroskopske sastojke jakog ljepila (engl. *glue*) koje drži atomsku jezgru.) Već 1984. godine eksperimenti su nedvojbeno potvrdili po-

stojanje tih triju vrsta čestica sile, navedenih u Tablici 1.2. Fizičari vjeruju da gravitacijska sila također ima pridruženu česticu – graviton – ali njegovo postojanje tek treba potvrditi.

Sila	Čestica sile	Masa
jaka	gluon	0
slaba	foton	0
slaba	slabi baždarni bozoni	86, 97
gravitacija	graviton	0

Tablica 1.2. Četiri prirodne sile sa svojim pridruženim česticama sile i njihovim masama izraženima kao višekratnici mase protona. (Čestice slabe sile dijele se na dvije vrste, pa su navedene dvije mase. Teorijske studije pokazuju da bi masa gravitona trebala biti nula.)

Drugo zajedničko obilježje tih sila u tome je što upravo kao što masa čestice određuje koliko jako gravitacija utječe na česticu, a električni naboj čestice određuje koliko jako na nju utječe elektromagnetska sila, čestice su isto tako prožete

određenom količinom "jakog naboja" i "slabog naboja" koje određuju kako na njih utječu jaka i slaba sila. (Ta svojstva potanko izlažemo u tablici u bilješkama za ovo poglavlje.[1]) No kao i kod mase čestice, osim činjenice da su eksperimentalni fizičari pomno izmjerili ta svojstva, nitko ne može objasniti *zašto* se naš univerzum sastoji od upravo tih čestica, s upravo tim masama i nabojima sila.

Bez obzira na njihova zajednička svojstva, istraživanje samih fundamentalnih sila samo produbljuje ista pitanja. Na primjer, zašto postoje četiri fundamentalne sile? Zašto ne pet, ili tri, ili možda samo jedna? Zašto sile imaju tako

---

1 Tablica dolje razrada je tablice 1.1. U njoj je navedena masa i naboj čestica u svim trima porodicama. Svaka vrsta kvarka može nositi tri moguća naboja jake sile, koji su, možda pretjerano maštovito, nazvani prema bojama, a predstavljaku brojčane vrijednosti naboja jake sile. Navedeni naboji jake sile su, preciznije rečeno, "treća komponenta" slabog izospina. (Nismo naveli "desne" komponente čestica – one se razlikuju po tome što nemaju naboj slabe sile.)

Porodica 1

čestica	masa	električni naboj	slabi naboj	jaki naboj
elektron	0,00054	-1	-1/2	0
elektronski neutrino	$<10^{-8}$	0	1/2	0
gornji kvark	0,0047	2/3	1/2	crveni, zeleni, plavi
donji kvark	0,0074	-1/3	-1/2	crveni, zeleni, plavi

Porodica 2

čestica	masa	električni naboj	slabi naboj	jaki naboj
mion	0,11	-1	-1/2	0
mionski neutrino	<0,0003	0	1/2	0
začarani kvark	1,6	2/3	1/2	crveni, zeleni, plavi
čudni kvark	0,16	-1/3	-1/2	crveni, zeleni, plavi

različita svojstva? Zašto je djelovanje slabe i jake sile ograničeno na mikroskopske razmjere, dok gravitacija i elektromagnetska sila imaju neograničen doseg? I zašto je tako golema razlika u snazi svojstvenoj tim silama?

Kako bismo shvatili značenje posljednjeg pitanja, zamislimo da držimo jedan elektron u lijevoj ruci, drugi u desnoj, i prinesemo te dvije električki nabijene čestice jednu drugoj. Njihovo uzajamno gravitacijsko privlačenje pokušat će ih približiti, a elektromagnetsko odbijanje htjet će ih odvojiti. Koje je jače? Utakmica je neravnopravna: elektromagnetsko odbijanje je oko milijun milijardi milijardi milijardi milijardi (10^{42}) puta jače! Ako vaš desni biceps predstavlja snagu gravitacijske sile, onda bi se vaš lijevi biceps morao prostirati preko granica poznatog svemira kako bi predstavio snagu elektromagnetske sile. Jedini razlog zašto elektromagnetska sila u potpunosti ne nadvlada gravitaciju u svijetu oko nas krije se u tome što su stvari većinom sastavljene od jednake količine pozitivnih i negativnih električnih naboja, čije se

sile međusobno poništavaju. S druge strane, budući da je gravitacija uvijek privlačna, u njenom slučaju nema takvog poništavanja – više tvari naprosto znači jaču gravitacijsku silu. No govoreći u fundamentalnom smislu, gravitacija je ekstremno slabašna sila. (Ta činjenica objašnjava teškoće pri eksperimentalnom potvrđivanju postojanja gravitona. Potraga za najmanjim smotuljkom najslabašnije sile priličan je izazov.) Eksperimenti su pokazali i da je jaka sila oko sto-

Porodica 3

čestica	masa	električni naboj	slabi naboj	jaki naboj
tau	1,9	-1	-1/2	0
tauonski neutrino	<0,033	0	1/2	0
vršni kvark	189	2/3	1/2	crveni, zeleni, plavi
dubinski kvark	5,2	-1/3	-1/2	crveni, zeleni, plavi

tinu puta jača od elektromagnetske sile i oko stotinu tisuća puta jača od slabe sile. No, u čemu je razlog – *raison d'être* – za to što naš univerzum ima ta svojstva?

To pitanje nije nastalo iz dokona filozofiranja o tome zašto su neke pojedinosti ovakve a ne onakve; svemir bi bio posve drukčiji kad bi se svojstva tvari i čestica sile makar malo promijenile. Na primjer, postojanje stabilne jezgre koja tvori stotinjak elemenata iz periodne tablice u velikoj mjeri ovisi o omjeru između snaga jake i elektromagnetske sile. Protoni zgusnuti u atomskoj jezgri elektromagnetski se međusobno odbijaju; no srećom, jaka sila koja djeluje na njihove sastojke kvarkove nadvladava tu odbojnost i čvrsto ih vezuje. No vrlo malena promjena u omjeru snaga tih dviju sila lako bi poremetila ravnotežu među njima, i većina atomskih jezgara bi se raspala. Nadalje, kad bi masa elektrona bila nekoliko puta veća nego što jest, elektroni i protoni često bi se kombinirali i formirali neutrone, čime bi napumpali masu jezgre vodika (najjednostavnijeg elementa u svemiru, čija jezgra sadrži

samo jedan proton) te ometali stvaranje složenijih elemenata. Zvijezde počivaju na fuziji stabilnih jezgara, a one uopće ne bi nastajale kad bi se fundamentalna fizika promijenila kako smo naveli. I snaga gravitacijske sile također igra formativnu ulogu. Silna gustoća materije u jezgri zvijezde pogoni njenu nuklearnu peć i osnova je zvjezdane svjetlosti. Kad bi se snaga gravitacijske sile povećala, masa zvijezde bi se jače stegnula i znatno pojačala nuklearne reakcije. No upravo kao što blistavi bljesak mnogo brže iscrpljuje svoje gorivo nego skromni plamen svijeće, jačanje nuklearnih reakcija prouzročilo bi da zvijezde poput sunca gore mnogo brže, što bi razorno djelovalo na nastanak života kakav poznajemo. S druge strane, kad bi se snaga gravitacijske sile značajno smanjila, materija se uopće ne bi nagomilavala i tako zvijezde i galaksije uopće ne bi nastale.

Mogli bismo tako navoditi mnoge primjere, ali osnovna misao je jasna: univerzum je takav kakav jest jer materija i

čestice sila imaju svojstva koja imaju. No, postoji li znanstveno objašnjenje *zašto* imaju ta svojstva?

Teorija struna: osnovna zamisao

Teorija struna nudi jaku pojmovnu paradigmu u kojoj se prvi put naslućuje okvir za odgovore na ta pitanja. Razmotrimo prvo osnovnu ideju.

Čestice u Tablici 1.1 su "slova" cjelokupne materije. Upravo poput svojih jezičnih analogija, čini se da nemaju dublju, unutarnju strukturu. Teorija struna tvrdi drukčije. Prema teoriji struna, kad bismo mogli istražiti te čestice s još većom preciznošću – nekoliko redova veličine većom preciznošću od one koju nam pružaju naše današnje tehnološke sposobnosti – otkrili bismo da nijedna nije točkasta nego se sastoji od jednodimenzionalne *petlje*. Poput beskrajno tanke gumene vrpce, svaka čestica sadrži vibrirajuću, titrajuću,

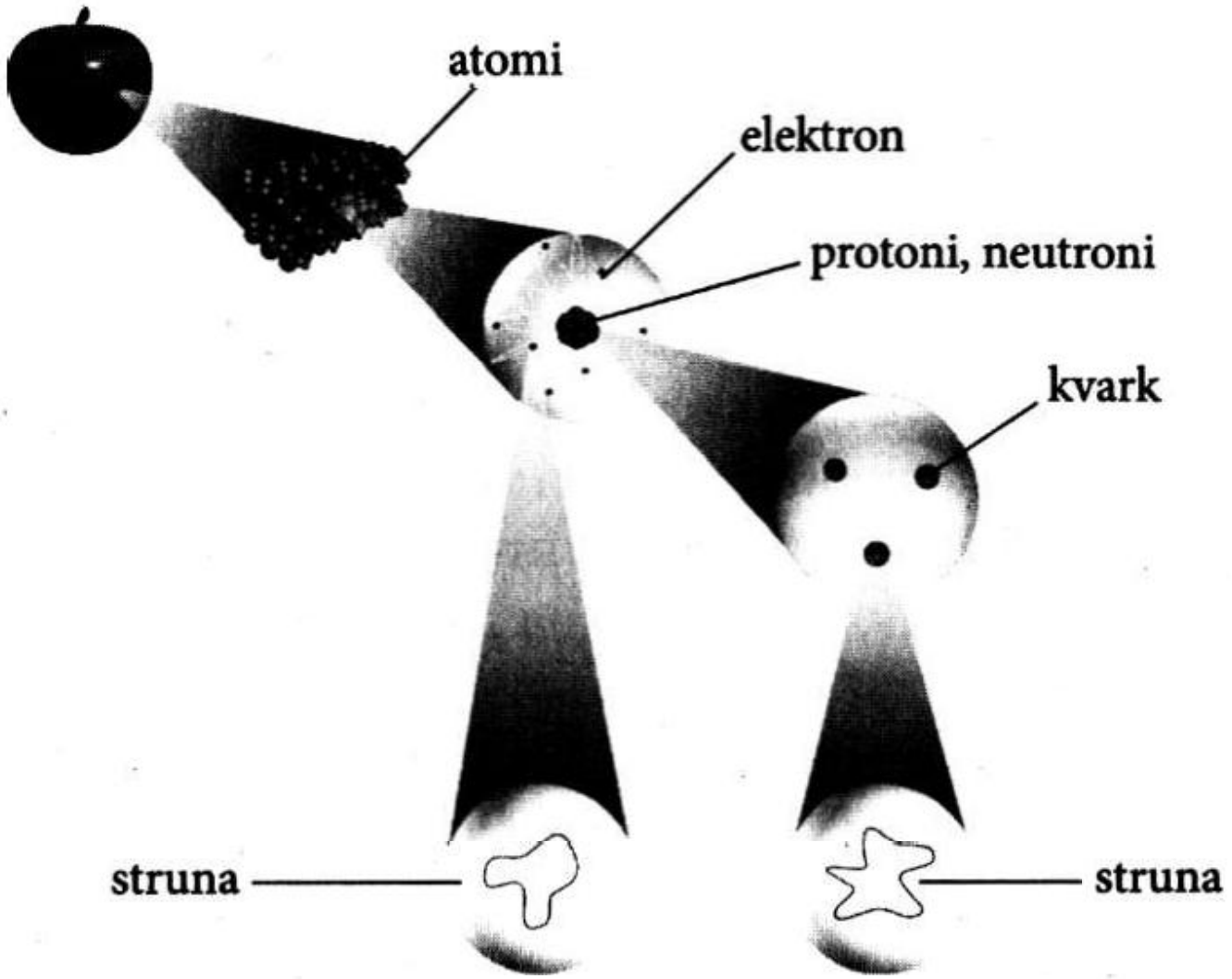
plešuću nit koju su fizičari, lišeni Gell-Mannovih književnih sklonosti, nazvali *strunom*. Na slici 1.1 ilustrirali smo tu osnovnu ideju teorije struna tako što smo počeli od običnog komada tvari, jabuke, i uporno povećavali njezinu strukturu kako bismo otkrivali njene sastojke u sve manjim razmjerima. Teorija struna već poznatoj progresiji od atoma, preko protona i neutrona do elektrona i kvarkova, dodaje nov mikroskopski sloj, titrajuću petlju.[2]

Premda to nipošto nije očito, u poglavlju 6 vidjet ćemo da ta jednostavna zamjena materijalnih sastojaka točkastih čestica strunama rješava neuskladivost kvantne mehanike i opće relativnosti. Teorija struna tako razrješuje središnji gordijski čvor suvremene teorijske fizike. To je golemo po-

---

[2] Strune mogu imati i dva pokretna kraja (to su takozvane *otvorene strune*), uz petlje (*zatvorene strune*) ilustrirane na slici 1.1. Kako bismo olakšali prezentaciju, uglavnom ćemo se usmjeriti na zatvorene strune, premda sve što ćemo reći vrijedi i za jedne i za druge.

stignuće, ali ono je samo dio razloga zašto je teorija struna izazvala takvo uzbuđenje.



Slika 1.1 Materija se sastoji od atoma, koji se dalje sastoje od kvarkova i elektrona. Prema teoriji struna, sve te čestice zapravo su sićušne petlje titrajuće strune.

Teorija struna kao ujedinjena teorija svega

U Einsteinovo doba, jaka i slaba sila još nisu bile otkrivene, ali njega je duboko zabrinjavalo već samo postojanje dviju posebnih sila – gravitacije i elektromagnetizma. Einstein nije prihvaćao da se priroda zasniva na tako ekstravagantnom planu. Ta misao potaknula je njegovo tridesetogodišnje putovanje u potrazi za takozvanom *teorijom ujedinjenog polja*, o kojoj se nadao da će pokazati kako su te dvije sile zapravo manifestacija jednog velikog osnovnog načela. Ta donkihotska potraga izolirala je Einsteina od glavne struje fizike, koja se, naravno, mnogo više zanimala za istraživanje

novog, tada nastajućeg okvira kvantne mehanike. Početkom 1940-ih napisao je prijatelju: "Pretvorio sam se u usamljenog starca koji je poznat prije svega po tome što ne nosi čarape i služi kao kuriozitet u posebnim prigodama."[3]

Einstein je jednostavno bio ispred svoga vremena. Više od pedeset godina kasnije, njegov san o ujedinjenoj teoriji postao je sveti gral moderne fizike. A znatan dio zajednice fizičara i matematičara sve je više uvjeren da teorija struna može ponuditi odgovor. Iz jednog načela – da se sve na mikroskopskoj razini sastoji od kombinacija titrajućih niti – teorija struna stvara jedan jedini okvir za objašnjenje koji je kadar obuhvatiti sve sile i svu materiju.

Na primjer, teorija struna proglašava da su uočena svojstva čestica, sažeta u tablicama 1.1 i 1.2, odraz raznih načina vibriranja strune. Kao što strune na violini ili u klaviru imaju rezonantnu frekvenciju na kojoj spremno titraju – pravilnosti koje naše uho čuje kao razne glazbene tonove i njihove

više alikvotne tonove – isto vrijedi i za petlje teorije struna. No vidjet ćemo da, umjesto da proizvodi glazbene tonove, svaka pravilnost titranja strune u teoriji struna pojavljuje se kao čestica čija su masa i sila određene oscilacijskim obrascem strune. Elektron je struna koja titra na jedan način, gornji kvark je struna koja titra na drugi način i tako dalje. Daleko od toga da budu zbirka kaotičnih činjenica dobivenih eksperimentima, svojstva čestica u teoriji struna manifestacija su jednog i istog fizikalnog obilježja: rezonantnih obrazaca titranja – takoreći, glazbe – fundamentalnih petlji strune. Ista zamisao primjenjuje se i na prirodne sile. Vidjet ćemo da su čestice sila također pridružene osobitim obrascima titranja struna i stoga je sve, sva materija i sve čestice, ujedinjeno u istoj rubrici mikroskopskih oscilacija struna – čestice su "note" koje strune mogu odsvirati.

---

[3] Albert Einstein, u pismu prijatelju iz 1942, citiran u: Tony Hey i Patrick Walters, *Einstein's Mirror* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997).

Tako prvi put u povijesti fizike imamo okvir kadar objasniti sva fundamentalna svojstva na kojima je izgrađen univerzum. Stoga se teorija struna katkad opisuje kao ono što bi moglo biti "teorija svega" (T. O. E., "theory of everything") ili "posljednja" ili "konačna" teorija. Ti grandiozni opisni izrazi trebali bi označavati najdublju moguću fizikalnu teoriju – teoriju u osnovi svih drugih, teoriju koja ne zahtijeva, pa čak niti ne dopušta dublju eksplanatornu osnovu. U praksi, mnogi teoretičari struna prihvaćaju manje uzvišen pristup i shvaćaju T.O.E. u ograničenom smislu, kao teoriju koja može objasniti svojstva fundamentalnih čestica i svojstva sila kojima one stupaju u interakcije i utječu jedna na drugu. Strog redukcionist ustvrdio bi da to uopće nije nikakvo ograničenje i da se u principu apsolutno sve, od velikog praska do sanjarenja, može opisati mikroskopskim fizikalnim procesima u osnovi svega, a koji uključuju fundamentalne sastojke materije. Redukcionist kaže: ako razumijete sve o sastojcima, onda razumijete apsolutno sve.

Redukcionistička filozofija lako pokreće žustre polemike. Mnogi smatraju da je krajnje glupo, pa čak i naprosto odvratno tvrditi da su čuda života i univerzuma puki odrazi mikroskopskih čestica u besmislenom plesu u koreografiji zakona fizike. Zar doista osjećaji radosti, tuge ili dosade nisu ništa drugo nego kemijske reakcije u mozgu – reakcije između molekula i atoma, koje su, na još dubljoj mikroskopskoj razini, reakcije između nekih čestica u tablici 1.1, čestica koje su zapravo samo titrajuće strune? Nobelovac Steven Weinberg odgovara na takve kritike upozoravajući u svojoj knjizi *U potrazi za konačnom teorijom*:

> Na drugom kraju spektra su protivnici redukcionizma, zgroženi onime što doživljavaju kao mrak moderne znanosti. Bez obzira na to do koje se mjere oni i njihov svijet mogu reducirati na pitanje čestica ili polja i njihovih interakcija, oni osjećaju da ih takvo znanje ponižava... Tim kritičarima ne bih želio odgovoriti predavanjem o divotama moderne znanosti. Redukcionističko gledište hladno je

i impersonalno. Mora ga se prihvatiti kakvo jest, ne zato što nam se to sviđa nego zato što svijet tako funkcionira.[4]

Neki se slažu s tim strogim gledištem, a neki ne.

Drugi su pokušali argumentirati da nam razvoj teorije kaosa kazuje da nove vrste zakona ulaze u igru kad raste razina kompleksnosti sustava. Jedno je razumjeti ponašanje elektrona ili kvarka, a primijeniti to znanje da bismo razumjeli ponašanje tornada nešto je posve drugo. Većina se slaže s tim. No mišljenja se razilaze u vezi s tim predstavljaju li raznolike i često neočekivane pojave koje mogu nastati u sustavima složenijim od pojedinačnih čestica doista nova fizikalna načela na djelu, ili su ta načela izvedena i oslanjaju se, premda na strašno kompliciran način, na fizikalna načela koja vladaju golemim brojem elementarnih sastojaka. Ja držim da ona ne predstavljaju nove, neovisne zakone fizike. Iako bi bilo teško objasniti svojstva tornada pojmovima fizike elektrona i kvarkova, to smatram pitanjem nemogućnosti izvođenja svih potrebnih izračuna, a ne naznakom novih

fizikalnih zakona. No, neki se ne slažu s tim gledištem.

No jedno gotovo uopće nije sporno, a to je presudno za putovanje koje opisujemo u ovoj knjizi: čak i ako prihvatimo spornu logiku strogog redukcionista, načelo je jedno, a praksa nešto posve drugo. Gotovo svi se slažu da otkriće T.O.E. uopće ne bi značilo da su psihologija, biologija, geologija, kemija, pa čak ni fizika, razriješene ili u nekom smislu podvrgnute. Univerzum je tako čudesno bogat i zamršen da otkriće konačne teorije, u smislu kako je ovdje opisujemo, ne bi nikakvom čarolijom okončalo znanost. Upravo suprotno: otkriće T.O.E. – konačnog objašnjenja univerzuma na najdubljoj, mikroskopskoj razini, teorije koja ne počiva ni na kakvom dubljem objašnjenju – ponudilo bi najčvršći temelj na kojem bismo *izgrađivali* svoje razumijevanje svije-

---

[4] Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon, 1992), str. 52. *Usp. U potrazi za konačnom teorijom* (Zagreb: Izvori, 1997).

ta. Konačna teorija ponudila bi postojan stup koherencije, i bili bismo zauvijek sigurni da je univerzum razumljiv.

Stanje teorije struna

Glavna tema ove knjige je objasniti funkcioniranje univerzuma u skladu sa teorijom struna, a glavni naglasak bit će na implikacijama koje ti rezultati imaju za naše razumijevanje prostora i vremena. Za razliku od mnogih drugih izlaganja znanstvenog razvoja, naše se ne odnosi na već potpuno razrađenu teoriju, potvrđenu strogim eksperimentalnim testovima i prihvaćenu u cijeloj znanstvenoj zajednici. Razlog tome, kao što ćemo raspraviti u sljedećim poglavljima, jest to što je teorija struna tako duboka i istančana teorijska struktura da ćemo čak i uz impresivan napredak protekla dva desetljeća imati još mnogo posla prije nego što budemo

mogli ustvrditi da smo posve ovladali njome.

Dakle, teoriju struna treba gledati kao djelo na kojemu se još radi, a čije je djelomično dovršenje već otkrilo zadivljujuće spoznaje o prirodi prostora, vremena i materije. Skladno sjedinjenje opće teorije relativnosti i kvantne mehanike velik je uspjeh. Štoviše, za razliku od svake prethodne teorije, teorija struna ima sposobnost odgovoriti na primordijalna pitanja, o najdubljim sastavnicama i silama prirode. Od jednake je važnosti, premda ju je teže izraziti, izrazita elegancija odgovora koje teorija struna predlaže, kao i samog njihova okvira. Na primjer, u teoriji struna mnogi aspekti prirode koji su naizgled tek arbitrarni tehnički detalji – poput broja odvojenih temeljnih sastojaka čestica i njihovih svojstava – izviru iz bitnih i opipljivih aspekata geometrije univerzuma. Ako je teorija struna istinita, mikroskopsko tkivo našeg univerzuma je bogato isprepleten multidimenzionalni labirint u kojemu se strune univerzuma beskonačno uvijaju i titraju, ritmično svirajući zakone kozmosa. Daleko od toga da

budu tek slučajne pojedinosti, svojstva osnovnih građevnih blokova prirode duboko su isprepletena s tkivom prostora i vremena.

Međutim, u konačnoj analizi ništa nije zamjena za konkretna, provjerljiva predviđanja koja mogu odrediti je li teorija struna doista podigla veo tajne koji skriva najdublje istine našeg univerzuma. Možda će trebati proteći neko vrijeme prije nego steknemo dovoljno duboko razumijevanje da bismo ostvarili taj cilj, ali, kao što ćemo vidjeti u poglavlju 9, provjere putem eksperimenata mogle bi tijekom sljedećih desetak godina dati jaku posrednu podršku teoriji struna. Štoviše, u poglavlju 13 vidjet ćemo da je teorija struna nedavno riješila glavnu zagonetku u vezi s crnim rupama, povezanu s takozvanom Bekenstein-Hawkingovom entropijom, koja je više od četvrt stoljeća izmicala rješenju konvencionalnim sredstvima. Taj uspjeh uvjerio je mnoge da je teorija struna na dobrom putu da nam pruži najdublje spoznaje o funkcioniranju univerzuma.

Edward Witten, jedan od pionira i vodećih stručnjaka za teoriju struna, sažeto je okarakterizirao situaciju rekavši da je "teorija struna dio fizike dvadeset prvog stoljeća koji je nekim slučajem dospio u dvadeseto stoljeće", što je ocjena koju je prvi uobličio slavni talijanski fizičar Daniele Amati.[5] Dakle, u nekom smislu, to je kao da su naši prethodnici krajem devetnaestog stoljeća dobili moderni superkompjutor, ali bez uputa za upotrebu. Domišljatim pokušajima i pogreškama naslutili bi moć superkompjutora, ali za istinsko ovladavanje njime trebalo bi uložiti mnogo vremena i truda. Naznake o potencijalu superkompjutora, poput naših slutnji o eksplanatornoj moći teorije struna, bile bi vrlo jaka motivacija da se ostvari njegova potpuna moć. Slična motivacija danas prožima cijelu generaciju teorijskih fizičara i nagoni ih da traže potpuno i precizno analitičko razumijevanje teorije struna.

---

5 Intervju s Edwardom Wittenom, 11. svibnja 1998.

Wittenova primjedba, kao i mišljenja drugih stručnjaka na tom polju, naznačuju da bi mogla proteći desetljeća, a možda i stoljeća dok se teorija struna u potpunosti ne razvije i razumije. To bi doista moglo biti istina. Zapravo, matematika teorije struna tako je zamršena da danas još nitko ne zna kako točno glase njene jednadžbe. Umjesto toga, fizičari znaju samo aproksimacije tih jednadžbi, a čak i te približne jednadžbe tako su komplicirane da su do danas riješene tek djelomično. No ipak, niz uspjeha u drugoj polovici 1990-ih – odgovora na teorijska pitanja dosad nezamislive kompleksnosti – možda je naznaka da je potpuno razumijevanje teorije struna mnogo bliže nego što se mislilo na početku. Fizičari diljem svijeta razvijaju nove, moćne tehnologije kako bi prevladali brojne aproksimacijske metode koje se dosad primjenjivalo, te tempom koji oduševljava kolektivno slažu neusklađene elemente slagalice teorije struna.

Začudo, ti razvojni procesi pružaju nova gledišta za po-

novno tumačenje nekih osnovnih aspekata teorije koji su već neko vrijeme prisutni. Na primjer, kad ste pogledali sliku 1.1, možda ste se prirodno zapitali: zašto strune? Zašto ne mali frizbiji? Ili mikroskopski bezoblični grumenčići? Ili kombinacija svih tih mogućnosti? Kao što ćemo vidjeti u poglavlju 12, najnovije spoznaje pokazuju da te druge vrste sastojaka doista imaju važnu ulogu u teoriji struna i otkrivaju da je teorija struna zapravo dio još šire sinteze koju se zasad (zagonetno) naziva M-teorijom. Te najnovije teorije bit će predmet završnih poglavlja knjige.

Napredak u znanosti neravnomjeran je. Neka razdoblja puna su važnih spoznaja, a u drugima istraživači ostaju na suhom. Znanstvenici ističu rezultate, i teorijske i eksperimentalne. O rezultatima raspravlja zajednica: katkad ih odbaci, katkad izmijeni, a katkad posluže kao nadahnuće za druge, preciznije načine razumijevanja fizičkog univerzuma. Drugim riječima, znanost napreduje u cik-caku prema onome o čemu se nadamo da će biti konačna istina, putem

koji je počeo prvim pokušajima čovječanstva da proniknu svijet, a kraj mu ne možemo predvidjeti. Bilo da je teorija struna usputni zastoj na tom putu ili pak posljednja stanica – to još ne znamo. No posljednja dva desetljeća istraživanja koja su provele stotine predanih fizičara i matematičara iz brojnih zemalja daju nam dobro utemeljenu nadu da smo na pravom, a možda i završnom putu.

To što smo već na našoj sadašnjoj razini uspjeli steći nove spoznaje u djelovanju univerzuma govori mnogo o bogatoj i dalekosežnoj prirodi teorije struna. Glavna tema ove knjige bit će teorije koje provode revoluciju u našem razumijevanju prostora i vremena, koju su pokrenule Einsteinova specijalna i opća teorija relativnosti. Vidjet ćemo da, ako je teorija struna ispravna, onda tkivo našeg univerzuma ima svojstva koja bi zaprepastila čak i samoga Einsteina.

2. DIO

DILEMA O PROSTORU, VREMENU I KVANTIMA

DRUGO POGLAVLJE

Prostor, vrijeme i oko promatrača

U lipnju 1905. dvadesetšestogodišnji Albert Einstein podastro je stručan članak njemačkom časopisu *Anali fizike*, u kojemu je proradio paradoks o svjetlosti koji ga je mučio još otkad je bio mladić, desetak godina ranije. Okrenuvši posljednju stranicu tog Einsteinovog rukopisa, urednik časopisa, Max Planck, shvatio je da je prihvaćeni znanstveni

poredak upravo zbačen. Bez pompe i fanfara, službenik patentnog zavoda iz Berna, u Švicarskoj, u potpunosti je svrgnuo tradicionalne pojmove prostora i vremena i zamijenio ih novom koncepcijom, čija svojstva proturječe svemu što nam je poznato iz svakodnevnog iskustva.

Paradoks koji je mučio Einsteina više od deset godina bio je u sljedećem. Sredinom devetnaestog stoljeća, nakon što je pomno proučio eksperimentalni rad engleskog fizičara Michaela Faradaya, škotski fizičar James Clerk Maxwell uspio je ujediniti elektricitet i magnetizam u okvir *elektromagnetskog polja*. Ako ste ikad bili na vrhu planine neposredno prije jake oluje ili stajali u blizini Van de Graafovog generatora, onda imate tjelesno iskustvo elektromagnetskog polja, jer ste ga osjetili. Ako niste, ono je donekle nalik na plimu električnih i magnetskih silnica koje prožimaju područje prostora kroz koje prolaze. Na primjer, kad posipate željeznu piljevinu u blizini magneta, uredan raspored koji ona poprimi prati neke od nevidljivih silnica magnetske sile.

Kad skinete vuneni džemper nekog posebno suhog dana i začujete pucketanje, a možda i osjetite koji udar, svjedočite električnim silnicama koje su stvorili električni naboji oslobođeni iz niti u vašem džemperu. Osim što je ujedinila te i sve druge električne i magnetske pojave u jednom matematičkom okviru, Maxwellova teorija pokazala je – posve neočekivano – da elektromagnetski poremećaji putuju fiksiranom i nepromjenjivom brzinom, brzinom koja se pokazala jednakom brzini svjetlosti. Na temelju toga Maxwell je shvatio da vidljiva svjetlost nije ništa drugo nego osobita vrsta elektromagnetskog vala, o kojoj danas znamo da stupa u interakcije s kemikalijama u mrežnici i tako potiče osjet svjetla. Štoviše (a to je presudno), Maxwellova teorija pokazala je i da su svi elektromagnetski valovi – a među njima i vidljiva svjetlost – primjer neumornog putnika. Nikad ne zastaju. Nikad ne usporavaju. Svjetlost *uvijek* putuje brzinom svjetlosti.

Sve je to lijepo i dobro dok ne upitamo, kao što se zapi-

tao šesnaestogodišnji Einstein, što bi se dogodilo kad bismo jurili za zrakom svjetlosti, i to brzinom svjetlosti? Intuitivna logika, ukorijenjena u Newtonovim zakonima gibanja, kaže nam da bismo dostigli valove svjetlosti i stoga bi nam se činilo da stoje: svjetlost bi mirno stajala. No prema Maxwellovoj teoriji, a i svim pouzdanim promatranjima, nepomična svjetlost naprosto ne postoji: nitko nikad nije držao nepomičnu gomilicu svjetlosti na dlanu. Eto nam problema. Srećom, Einstein nije znao da su se mnogi vodeći svjetski fizičari borili s tim pitanjem (i pošli mnogim neobičnim putovima) te se udubljivali u paradoks Maxwella i Newtona, uglavnom u neokaljanoj privatnosti vlastitih misli.

U ovom poglavlju raspravljamo kako je Einstein riješio taj sukob u svojoj specijalnoj teoriji relativnosti, a time je i zauvijek promijenio naše poimanje prostora i vremena. Vjerojatno iznenađuje to što je osnovna tema specijalne teorije relativnosti razumjeti kako se točno svijet pojavljuje poje-

dincima, često nazivanima "promatrači", koji se gibaju jedan u odnosu na drugoga. To bi se isprva moglo činiti poput ne baš važne intelektualne vježbe. No upravo je suprotno: duboke su implikacije kad u potpunosti shvatimo kako se i najsvakodnevnije situacije pojavljuju promatračima u relativnom gibanju, Einsteinovim promatračima koji jure za zrakom svjetla.

Intuicija i njezine zablude

Svakodnevno iskustvo ističe neke načine na koje se mogu razlikovati promatranja takvih osoba. Na primjer, drveće uz cestu naizgled se giba s gledišta vozača, ali autostoperu koji sjedi na ogradi ono se doima nepomičnim. Slično tome, upravljačka ploča automobila naizgled se ne giba s vozačeva gledišta (barem se nadamo!), ali s gledišta autostopera čini se da se giba zajedno s cijelim automobilom. To su tako osnov-

na i intuitivna svojstva svijeta da jedva da ih primjećujemo.

No, specijalna relativnost proglašava da su razlike u promatranju između dviju takvih osoba istančanije i dublje. Ona iznosi neobičnu tvrdnju da će promatrači u relativnom gibanju imati različite percepcije udaljenosti i vremena. To znači, kao što ćemo vidjeti, da će identični satovi dviju osoba u relativnom gibanju otkucavati *različitim tempom* i stoga se neće poklapati s obzirom na vrijeme izmjereno između odabranih događaja. Specijalna relativnost dokazuje da ta izjava nije kleveta koja šteti ugledu satova s obzirom na njihovu preciznost; ona je zapravo istinita tvrdnja o samome vremenu.

Slično tome, promatrači u relativnom gibanju koji nose identične krojačke metre neće se složiti s obzirom na izmjerene udaljenosti. Ni to nema veze s nepreciznošću mjernog uređaja niti s njegovom pogrešnom upotrebom. Najprecizniji mjerni uređaji na svijetu potvrđuju da prostor i vrijeme

– koje mjerimo udaljenostima i trajanjima – ne doživljavamo svi jednako. Na način koji je Einstein precizno odredio, specijalna relativnost razrješava sukob između naše intuicije o gibanju i svojstava svjetlosti, ali pritom se mora platiti i cijena: osobe koje se gibaju jedna u odnosu na drugu neće imati jednake zamjedbe prostora ili vremena.

Prošlo je gotovo stotinu godina otkad je Einstein obavijestio svijet o svom dramatičnom otkriću, ali većina nas ipak i dalje vidi prostor i vrijeme kao apsolutne. Specijalna relativnost nije nam u kostima – ne osjećamo je. Njezine implikacije nisu u srži naše intuicije. Razlog tome vrlo je jednostavan: učinci specijalne relativnosti ovise o tome koliko brzo se gibamo, a pri brzini naših automobila, aviona, pa čak i svemirskih brodova, ti učinci su neznatni. Razlike u percepciji prostora i vremena između osoba na tlu i onih koje putuju u automobilima ili avionima ipak nastaju, ali tako su malene da prolaze neprimijećene. No, kad bismo krenuli u futurističkom svemirskom brodu, brzinom koja

je znatniji dio brzine svjetlosti, učinci relativnosti postali bi očiti. Naravno, to je sve još u domeni znanstvene fantastike. No ipak, kao što ćemo vidjeti u sljedećim poglavljima, vješto izvedeni eksperimenti omogućuju jasno i precizno promatranje relativnih svojstava prostora i vremena koje je predvidio Einstein.

Kako bismo dobili dojam o razmjerima koji su pritom na djelu, zamislimo da je godina 1970. i u modi su veliki, brzi automobili. Slim je upravo potrošio svu ušteđevinu na novi Pontiac Trans Am i s bratom Jimom uputio se na lokalnu pistu za utrke dragstera kako bi iskušao auto onako kako mu prodavač nikad ne bi dopustio. Slim turira motor i hita 1609 metara dugačkom pistom brzinom od 193 kilometra na sat, dok Jim stoji pokraj piste i mjeri mu vrijeme. Želeći neovisnu potvrdu, i Slim štopericom mjeri vrijeme koje je njegovom autu potrebno da prijeđe pistu. Prije Einsteinovog rada nitko ne bi doveo u pitanje da će, ako imaju ispravne

štoperice, i Slim i Jim izmjeriti identično proteklo vrijeme. No prema specijalnoj relativnosti, dok će Jim izmjeriti proteklo vrijeme od 30 sekundi, Slimova štoperica zabilježit će protok vremena od 29,9999999999952 sekundi – *mrvicu manje*. Naravno, ta razlika tako je malena da bi se mogla zabilježiti samo mjerenjem čija je preciznost mnogo veća od sposobnosti ručnih štoperica koje rade na pritisak prstom, sustava mjerenja vremena na Olimpijadi, pa čak i najpreciznije izrađenih atomskih satova. Nije čudo da naše svakodnevno iskustvo ne otkriva činjenicu da protok vremena ovisi o našem gibanju.

Do sličnih će neslaganja doći i pri mjerenju duljine. Na primjer, na sljedećoj probnoj vožnji Jim se posluži pametnim trikom ne bi li izmjerio duljinu Slimovog novog auta: pokrene štopericu čim prednji dio auta dođe do njega, a zaustavi je čim prođe stražnji dio auta. Budući da Jim zna da slim hita brzinom od 193 kilometra na sat, može izračunati duljinu automobila pomnoživši tu brzinu vremenom pro-

teklim na štoperici. Opet, prije Einsteina nitko ne bi doveo u pitanje da bi se duljina koju Jim mjeri na taj neizravan način poklopila s duljinom koju je Slim pažljivo izmjerio kad je auto stajao u salonu. Suprotno tome, specijalna relativnost proglašava da, ako Slim i Jim izvedu precizna mjerenja i Slim zaključi da je automobil dugačak recimo 5 metara, onda će Jimovo mjerenje pokazati da je automobil dugačak 4,9999999999991875 metara– mrvicu manje. Kao i pri mjerenju vremena, to je tako sićušna razlika da obični instrumenti naprosto nisu dovoljno precizni da je otkriju.

Iako su te razlike ekstremno malene, one upućuju na fatalnu pogrešku u uobičajenom poimanju univerzalnoga i nepromjenjivoga prostora i vremena. Kako se relativna brzina osoba kao što su Slim i Jim povećava, ta pogreška postaje sve uočljivija. Da bi nastala primjetna razlika, brzine moraju biti znatan dio najveće moguće brzine – brzine svjetlosti – koju Maxwellova teorija i eksperimentalna mje-

renja određuju kao otprilike 300 000 kilometara u sekundi, ili oko 1,080 milijardi kilometara na sat. Tom brzinom oko Zemlje se može obići 7,5 puta u sekundi. Na primjer, kad Slim ne bi vozio brzinom od 193 kilometra na sat nego oko 933 milijuna kilometara na sat (oko 87 posto brzine svjetlosti), matematika specijalne relativnosti predviđa da bi Jim izmjerio da je automobil dugačak oko 2 i pol metra, što je bitno drukčije od Slimova mjerenja (kao i od proizvođačevih specifikacija). Slično tome, vrijeme potrebno da prijeđe pistu za dragstere prema Jimu bi bilo oko dvostruko dulje od vremena koje je izmjerio Slim.

Budući da su tako ogromne brzine danas daleko od svega što se može postići, učinci "dilatacije vremena" i "Lorentzove kontrakcije", kako se te pojave stručno nazivaju, u svakodnevici su ekstremno maleni. Kad bismo kojim slučajem živjeli u svijetu u kojemu se stvari obično gibaju brzinom bliskom brzini svjetlosti, ta svojstva prostora i vremena bila bi u cjelini intuitivna – jer bismo ih neprekidno doživljavali

– i o njima ne bismo uopće raspravljali, kao što ne raspravljamo o prividnom gibanju stabala u drvoredu pokraj ceste s početka ovog poglavlja. No budući da ne živimo u takvom svijetu, ta svojstva su nam strana. Kao što ćemo vidjeti, da bismo ih razumjeli i prihvatili, morat ćemo iz temelja preurediti svoj pogled na svijet.

Načelo relativnosti

Dvije su jednostavne, ali duboko ukorijenjene strukture koje tvore temelj specijalne relativnosti. Kao što smo spomenuli, jedna od njih odnosi se na svojstva svjetlosti; to ćemo podrobnije raspraviti u sljedećem odjeljku. Druga je apstraktnija. Ne odnosi se ni na koji određeni fizikalni zakon nego na sve fizikalne zakone, a poznata je kao načelo relativnosti. Načelo relativnosti počiva na jednostavnoj činjenici: kad

god raspravljamo o brzini ili *vektorskoj brzini* (brzini predmeta i smjeru njegova gibanja), moramo precizno odrediti tko ili što obavlja mjerenje. Značenje i važnost te tvrdnje lakše ćemo razumjeti ako razmotrimo sljedeću situaciju.

Zamislimo da George, koji nosi skafander s malenim treperavim crvenim svjetlom, lebdi u apsolutnoj tami posve praznoga svemira, daleko od svih planeta, zvijezda i galaksija. Iz Georgeove perspektive, on je posve nepomičan, uronjen u jednoličnu, mirnu crninu svemira. Negdje daleko, George ugleda maleno, titravo zeleno svjetlo koje se naizgled približava. Na kraju mu se ono približi dovoljno da vidi da je svjetlo pričvršćeno za skafander drugog astronauta, Gracie, koja polagano lebdi pokraj njega. Ona mu maše u prolasku, kao i George, i ona nestaje u daljini. Tu priču s jednakom valjanošću tako može ispričati i Gracie iz svoje perspektive. Počinje na isti način: Gracie je posve sama u nepreglednoj mirnoj tami dubokog svemira. Negdje daleko, ugleda maleno, titravo crveno svjetlo koje joj se naizgled približava. Na

kraju joj se približi dovoljno da vidi da je svjetlo pričvršćeno za skafander drugog astronauta, Georgea, koji polagano lebdi pokraj njega. On joj maše u prolasku, kao i Gracia, i ona nestaje u daljini.

Te dvije priče opisuju jednu istu situaciju s dva različita, ali jednako valjana gledišta. Oba promatrača osjećaju da miruju, a drugoga vide u gibanju. Obje perspektive su razumljive i mogu se opravdati. Budući da postoji simetrija između dvoje astronauta, na bitnoj razini ne može se reći da je jedna perspektiva "ispravna", a druga "pogrešna". Obje perspektive imaju jednako pravo na istinitost.

Taj primjer dobro izražava značenje načela relativnosti: pojam gibanja je relativan. Možemo govoriti o gibanju predmeta, ali samo relativno u odnosu na drugi, ili u usporedbi s drugim. Stoga izjava "George putuje brzinom od 16 kilometara na sat" nema nikakva značenja, jer nismo odredili nikakav drugi predmet za usporedbu. Izjava "George prolazi

brzinom od 16 kilometara na sat pokraj Gracie" *ima* značenje, jer smo sad naveli Gracie kao referencu. Kao što se vidi iz našeg primjera, posljednja izjava posve je jednakovrijedna izjavi "Gracie prolazi brzinom od 16 kilometara na sat pokraj Georgea (u suprotnom smjeru)". Drugim riječima, ne postoji nikakav "apsolutni" pojam gibanja. Gibanje je relativno.

Glavni element te priče jest to što ni Georgea ni Gracie ništa ne gura, ne povlači niti na bilo koji drugi način ne djeluje nikakva sila ni utjecaj koji bi mogao poremetiti njihovo uzvišeno stanje gibanja stalnom brzinom, bez ikakvih sila. Dakle, preciznija tvrdnja bila bi da gibanje *bez sila* ima značenje samo u usporedbi s drugim predmetima. To je važno pojašnjenje, jer ako djeluju sile, one uzrokuju promjene u vektorskoj brzini promatrača – promjene u brzini i/ili smjeru gibanja – a te se promjene mogu osjetiti. Na primjer, kad bi George nosio raketnu naprtnjaču koja ispaljuje raketni mlaz s njegovih leđa, on bi itekako osjećao da se giba. Taj osjećaj je u nutrini. Ako je raketna naprtnjača uključena, Ge-

orge zna da se giba, čak i ako su mu oči zatvorene i stoga ne može obavljati usporedbe s drugim predmetima. Čak i bez tih usporedaba, on ne bi dalje tvrdio da je nepomičan dok "ostali svijet putuje pokraj njega". Gibanje stalnom brzinom je relativno; no to ne vrijedi za gibanje nestalnom brzinom ili, što je isto, *ubrzano gibanje*. (Toj tvrdnji vratit ćemo se u sljedećem poglavlju, kad budemo proučavali ubrzano gibanje i raspravljali o Einsteinovoj općoj teoriji relativnosti.)

To što smo te priče smjestili u tamu praznoga prostora pomoći će nam da bolje razumijemo problem, jer smo uklonili poznate stvari poput ulica i zgrada, kojima obično, premda neopravdano, dajemo poseban status "nepomičnoga". No isto načelo vrijedi i za zemaljske okvire, i zapravo, doživljavamo ga u svakodnevici.[1] Na primjer, zamislite

---

[1] Prisutnost masivnih tijela poput Zemlje komplicira stvari jer uvodi gravitacijske sile. Budući da se sada usredotočujemo na gibanje u horizontalnom smjeru – ne u vertikalnom smjeru – prisutnost

da ste zaspali u vlaku i probudili se upravo u trenutku kad vaš vlak prolazi pokraj drugoga na paralelnim tračnicama. Kako vam je pogled kroz prozor u potpunosti blokirao drugi vlak i tako vam onemogućuje da vidite sve druge predmete, možda neko vrijeme nećete biti sigurni giba li se vaš vlak, drugi vlak ili oba. Naravno, ako se vaš vlak zatrese ili zaljulja, ili ako promijeni smjer u zavoju, osjetit ćete da se gibate. No ako je vožnja posve neometana – ako vektorska brzina vlaka ostaje stalna – promatrat ćete relativno gibanje između vlakova a da nećete biti u stanju sa sigurnošću reći koji se od njih giba.

Pođimo korak dalje. Zamislimo da smo u takvom vlaku i da spustimo zastore tako da potpuno prekrijemo prozore. Kad ne vidimo ništa izvan svoga odjeljka, uz pretpostavku da se vlak giba apsolutno konstantnom brzinom, nikako nećemo moći odrediti svoje stanje gibanja. Odjeljak oko vas izgledat će *potpuno* jednako bez obzira na to miruje li vlak na tračnicama ili se giba velikom brzinom. Einstein je

formalizirao tu ideju, koja zapravo potječe još od Galileovih spoznaja, ustvrdivši da ni vi ni bilo koji drugi putnik ne može izvesti nikakav eksperiment u zatvorenom odjeljku kojim biste odredili giba li se vlak ili ne. I to je izraz načela relativnosti: budući da je svako gibanje bez utjecaja sile relativno, ono ima značenje samo u usporedbi s drugim predmetima ili osobama koje su također u stanju inercijalnoga gibanja. Nikako ne možete odrediti ništa o svom stanju gibanja a da ne obavite nekakvu izravnu ili neizravnu usporedbu s "vanjskim" predmetima. Jednostavno, ne postoji pojam "apsolutnoga" gibanja stalnom brzinom; samo usporedbe mogu imati fizikalno značenje.

Zapravo, Einstein je shvatio da načelo relativnosti izriče još jaču tvrdnju: zakoni fizike – kakvi god bili – moraju biti apsolutno identični za sve promatrače u gibanju stalnom br-

---

Zemlje možemo i hoćemo ignorirati . U sljedećem poglavlju upustit ćemo se u detaljnu raspravu o gravitaciji.

zinom. Ako George i Gracie ne lebde samo u svemiru nego i provode isti niz eksperimenata u svojim lebdećim svemirskim stanicama, doći će do identičnih rezultata. Da ponovimo: oboje posve opravdano vjeruju da je upravo njihova stanica u mirovanju, iako su te dvije stanice u relativnom gibanju. Ako im je sva oprema identična, ta dva eksperimentalna sklopa ni po čemu se ne razlikuju – posve su simetrični. Zakoni fizike koje oni izvedu iz eksperimenata također će biti identični. Ni oni ni njihovi eksperimenti ne mogu osjetiti gibanje stalnom brzinom – to jest, ni na koji način ovisiti o njemu. Taj jednostavni pojam uspostavlja potpunu simetriju između takvih promatrača; taj pojam ugrađen je u načelo relativnosti. Uskoro ćemo vidjeti koliko su duboke njegove posljedice.

Brzina svjetlosti

Drugi presudan sastojak specijalne relativnosti odnosi se na svjetlost i svojstva njezina gibanja. Suprotno našoj tvrdnji da izjava "George putuje brzinom od 16 kilometara na sat" nema značenje bez navedene reference za usporedbu, gotovo jednostoljetni rad niza eksperimentalnih fizičara pokazao je da će se svi promatrači složiti da svjetlost putuje brzinom od 1,080 milijardi kilometara na sat *bez obzira na reference za usporedbu.*

Ta činjenica potaknula je revoluciju u našem pogledu na univerzum. Pogledajmo prvo što ona znači tako što ćemo je usporediti sa sličnim tvrdnjama primijenjenima na predmete iz naše okoline. Zamislimo da je lijep, sunčan dan i izašli ste van vježbati bejzbol s prijateljicom. Neko vrijeme oboje opušteno bacate loptu brzinom od, recimo, 7 metara u sekundi, kad se iznenada pojavi oluja s grmljavinom i oboje pohitate u najbliže sklonište. Kad oluja prođe, vas dvoje nastavite svoju igru, ali nešto se promijenilo. Kosa vaše pri-

jateljice razbarušila se i nakostriješila, a oči su joj zloslutne i izbuljene. Bacivši pogled na njenu ruku, zapanjeno vidite da se više nema namjeru loptati s vama nego se sprema baciti ručnu granatu. Razumljivo, vaš entuzijazam za loptanje znatno se smanji i okrenete se i pohitate spasiti živu glavu. Kad vaša prijateljica baci granatu, ona će i dalje ići prema vama, ali budući da trčite, brzina njenog približavanja bit će manja od 7 metara u sekundi. Zapravo, svakodnevno iskustvo nam govori da, ako možete trčati brzinom od, recimo, 4 metra u sekundi, onda će vam se ručna granata približavati brzinom od (7 – 4 =) 3 metra u sekundi. Drugi primjer: ako ste u planinama i prema vama se obrušava lavina, skloni ste okrenuti se i potrčati koliko vas noge nose jer će se tako smanjiti brzina kojom vam se približava snijeg – a to je uglavnom dobro. I u tom slučaju nepokretna osoba percipira da je brzina lavine koja joj se približava veća od brzine koju percipira osoba koja bježi.

Sad usporedimo ta osnovna opažanja o bejzbolskim lop-

tama, granatama i lavinama sa zamjedbama o svjetlosti. Da bi usporedbe bile čvršće, zamislimo da se zraka svjetlosti sastoji od sićušnih "paketića" ili "smotuljaka" poznatih kao fotoni (o tom svojstvu svjetlosti podrobnije ćemo u poglavlju 4). Kad uključimo baterijsku svjetiljku ili lasersku zraku, zapravo izbacujemo struju fotona u smjeru u kojem smo okrenuli uređaj. Kao i u slučaju s granatom i lavinom, pogledajmo kako se gibanje fotona doima nekome tko se giba. Zamislimo da je vaša sluđena prijateljica zamijenila granatu za snažan laser. Ako ispali lasersku zraku prema vama – i ako imate odgovarajuću mjernu opremu – vidjet ćete da se fotoni približavaju brzinom od 1,080 milijardi kilometara na sat. No što ako se bacite u bijeg, kao što se učinili suočeni s prijetnjom loptanja s ručnom granatom? Koju brzinu fotona koji vam se približavaju ćete tada izmjeriti? Da bi sve bilo još uvjerljivije, zamislite da se možete provozati međuzvjezdanim brodom Enterprise i šibati sve dalje od svoje prijate-

ljice, brzinom od, recimo, 160 milijuna kilometara na sat. Po logici zasnovanoj na tradicionalnom Newtonovom pogledu na svijet, budući da hitate, mogli biste očekivati da ćete izmjeriti *manju* brzinu fotona koji vas pristižu. Konkretno, mogli biste očekivati da ćete izmjeriti da se približavaju brzinom od (1,080 milijardi kilometara na sat – 160 milijuna kilometara na sat =) 920 milijuna kilometara na sat.

Obilje dokaza prikupljenih raznim eksperimentima još od 1880-ih, kao i pomnim analizama i tumačenjima Maxwellove elektromagnetske teorije svjetlosti, polako je uvjerilo znanstvenu zajednicu da zapravo *nećete* to vidjeti. *Iako se povlačite, ipak će izmjerena brzina fotona koji vam se približavaju biti 1,080 milijardi kilometara na sat, ni mrvicu manje.* Premda to na prvi pogled zvuči apsurdno, za razliku od onoga što se događa kad bježimo od lopte, granate ili lavine, brzina fotona koji vam se približavaju uvijek je 1,080 milijardi kilometara na sat. Isto vrijedi i ako trčite prema fotonima koji vam se približavaju ili ih lovite – njihova brzina

približavanja i udaljavanja nikad se ni najmanje ne promijeni; oni i dalje putuju brzinom od 1,080 milijardi kilometara na sat. Bez obzira na relativno gibanje između izvora fotona i promatrača, brzina svjetlosti uvijek je ista.[2]

Tehnološka ograničenja su takva da se opisani "eksperimenti" sa svjetlošću ne mogu izvesti. No, mogu se izvesti usporedivi eksperimenti. Na primjer, 1913. je nizozemski fizičar Willem de Sitter predložio da bi binarne zvijezde u brzom gibanju (dvije zvijezde koje orbitiraju jedna oko druge) mogle poslužiti za mjerenje učinka pokretnog izvora na brzinu svjetlosti. Razni eksperimenti te vrste proteklih osamdeset godina dokazali su da je brzina svjetlosti dospje-

---

[2] Preciznije rečeno, brzina svjetlosti u vakuumu je 1,080 milijardi kilometara na sat. Kad se svjetlost giba kroz tvar kao što je zrak ili staklo, brzina joj se smanjuje otprilike na isti način kao što kamen bačen sa stijene uspori kad padne u vodu. To usporavanje svjetlosti u odnosu na njezinu brzinu u vakuumu nema posljedica za našu raspravu o relativnosti pa ćemo je u cijelom tekstu opravdano ignorirati.

le sa zvijezde u gibanju *ista* kao i ona s nepomične zvijezde – 1,080 milijardi kilometara na sat – što je izmjereno s dojmljivom preciznošću sve istančanijih mjernih uređaja. Štoviše, u prošlom stoljeću provedeno je obilje drugih preciznih eksperimenata – eksperimenata koji su izravno mjerili brzinu svjetlosti u raznim okolnostima, kao i testirali mnoge implikacije koje proistječu iz tih obilježja svjetlosti – i svi su potvrdili konstantnost brzine svjetlosti.

Ako vam je teško progutati to svojstvo svjetlosti, niste jedini. Na prijelazu stoljeća fizičari nisu štedjeli truda ne bi li ga osporili. Nisu uspjeli. Za razliku od njih, Einstein je prihvatio konstantnost brzine svjetlosti, jer u njoj se krio odgovor na pitanje koje ga je mučilo otkad je bio mladić: koliko god se trudili dostići zraku svjetlosti, ona ipak bježi od vas brzinom svjetlosti. Ne možete postići da se prividna brzina kojom se svjetlost udaljava smanji ni za jotu manje od 1,080 milijardi kilometara na sat, a kamoli da se uspori do te mjere da postane nepomična. I gotovo. No, taj trijumf

nad paradoksom nije bio pobjeda samo po sebi. Einstein je shvatio da konstantnost brzine svjetlosti znači propast Newtonove fizike.

Istina i posljedice

Brzina je mjera toga koliko daleko neki predmet može prijeći u danom vremenu. Ako smo u automobilu koji ide 90 kilometara na sat, to dakako znači da ćemo prevaliti 90 kilometara ako sat vremena ustrajemo u tom gibanju. Izražena na taj način, brzina je prilično svakodnevan pojam i možda se pitate zašto smo digli toliku strku oko brzine bejzbolskih loptica, lavina i fotona. No, uočimo da je *udaljenost* pojam o prostoru – konkretno, to je mjera prostora između dviju točaka. Također uočimo da je *trajanje* pojam o vremenu – koliko vremena prođe između dvaju događaja. Dakle, brzi-

na je blisko povezana s našim pojmovima prostora i vremena. Kad to tako izrazimo, vidimo da svaka eksperimentalna činjenica koja poriče naše uobičajeno poimanje vremena, na primjer konstantnost brzine svjetlosti, ima potencijal da prkosi našim uobičajenim shvaćanjima samog prostora i vremena. Zbog toga ta neobična činjenica o brzini svjetlosti zaslužuje da je pomno proučimo – kao što je učinio Einstein, i došao do veoma važnih zaključaka.

Učinak na vrijeme: prvi dio

Uz minimalan trud, možemo iskoristiti konstantnost brzine svjetlosti kako bismo pokazali da je poznata, svakodnevna koncepcija vremena naprosto pogrešna. Zamislimo da su vođe dviju zaraćenih država, sjedeći na suprotnim krajevima dugačkog pregovaračkog stola, upravo ugovorili primirje, ali nijedna država ne želi potpisati ugovor prije nego što to učini

druga. Glavni tajnik Ujedinjenih naroda smisli sjajno rješenje. Između dvaju predsjednika postavit će se žarulja, koja će na početku biti ugašena. Kad se upali, svjetlo koje emitira doći će do obojice predsjednika istovremeno, jer su jednako udaljeni od žarulje. Oba predsjednika pristanu potpisati primjerak sporazuma kad vide svjetlo. Plan se provede u djelo i sporazum se potpiše na zadovoljstvo obiju strana.

Oduševljen uspjehom, glavni tajnik primijeni isti pristup i na druge dvije zaraćene države koje su također došle do sporazuma o primirju. Jedina je razlika u tome što predsjednici koji sudjeluju u pregovorima sjede za stolom u vlaku koji putuje stalnom brzinom. Prikladno, predsjednik Naprijedzemske gleda u smjeru gibanja vlaka, a predsjednik Natragzemske gleda u suprotnom smjeru. Upoznat s činjenicom da zakoni fizike imaju posve isti oblik bez obzira na nečije stanje gibanja sve dok je to gibanje jednoliko, glavni tajnik ne uzima u obzir tu razliku i izvodi ceremoniju palje-

nja žarulje kao i prvi put. Oba predsjednika potpišu sporazum, i zajedno sa svojom svitom savjetnika proslavljaju kraj neprijateljstava.

No tada stigne vijest da su izbili okršaji između državljana obiju zemalja koji su promatrali ceremoniju potpisivanja izvan vlaka u pokretu. Svi koji su bili u pregovaračkom vlaku s nevjericom čuju da je razlog za obnavljanje neprijateljstava tvrdnja državljana Naprijedzemske da su prevareni, jer je njihov predsjednik potpisao sporazum *prije* predsjednika Natragzemske. Budući da se svi u vlaku – s obiju strana – slažu da je sporazum potpisan u istom trenutku, kako može biti da promatrači koji su gledali ceremoniju izvana misle drukčije?

Razmotrimo podrobnije perspektivu promatrača na stanici. Na početku je žarulja u vlaku mračna, a tada se u određenom trenutku osvijetli i pošalje zrake svjetlosti prema obojici predsjednika. S gledišta osobe na platformi, predsjednik Naprijedzemske hita prema emitiranoj svjetlosti,

dok se predsjednik Natragzemske povlači od nje. Za promatrače na platformi to znači da zraka svjetlosti ne mora prijeći toliki put do predsjednika Naprijedzemske, koji se giba prema svjetlosti koja mu se približava, koliko mora do predsjednika Natragzemske, koji se od nje udaljava. To nije izjava o *brzini* svjetlosti koja putuje prema dvojici predsjednika – već smo utvrdili da je, bez obzira na stanje gibanja izvora ili promatrača, brzina svjetlosti uvijek ista. Umjesto toga, opisujemo koliko daleko, s gledišta promatrača na platformi, početna zraka svjetlosti mora prijeći do dvojice predsjednika. Budući da je ta udaljenost manja za predsjednika Naprijedzemske nego za predsjednika Natragzemske, svjetlost će prvo doći do predsjednika Naprijedzemske. Zato građani Naprijedzemske tvrde da su prevareni.

Kad CNN prenosi izvještaj svjedoka, glavni tajnik, dvojica predsjednika i njihovi savjetnici ne mogu vjerovati vlastitim ušima. Svi se slažu da je žarulja bila dobro učvršćena,

točno na pola puta između dvojice predsjednika te da je stoga, bez daljnje rasprave, svjetlost koju je emitirala prešla *jednaku* udaljenost do obojice njih. Budući da je brzina svjetlosti emitirane ulijevo i udesno jednaka, oni vjeruju, a tako su i percipirali, da je svjetlost očito došla do obojice predsjednika u istom trenutku.

Tko ima pravo, oni u vlaku ili oni izvan njega? Promatranja obiju grupa i njihova objašnjenja su besprijekorna. Odgovor glasi da *obje* grupe imaju pravo. Poput naših dvoje astronauta, Georgea i Gracie, obje perspektive imaju jednako pravo na istinitost. Jedina je neugodnost u tome što se te istine doimaju proturječnima. Riječ je o važnom političkom pitanju: jesu li predsjednici potpisali sporazum istovremeno? Promatranja i gore iznesena logika neizbježno nas vode prema zaključku da, *prema onima u vlaku, jesu*, a *prema onima na stanici, nisu*. Drugim riječima, stvari koje su istovremene s gledišta nekih promatrača neće biti istovremene s gledišta drugih, ako su dvije grupe u relativnom

gibanju.

Taj zaključak zaprepašćuje. To je jedna od najdubljih ikad otkrivenih spoznaja o prirodi stvarnosti. No ipak, ako se dugo nakon što odložite ovu knjigu od ovog poglavlja budete sjećali samo zlosretnog pokušaja mirenja, zapamtit ćete bit Einsteinova otkrića. Bez visoke matematike i zamršene logike, to posve neočekivano svojstvo vremena slijedi izravno iz konstantnosti brzine svjetlosti, kao što ilustrira navedena priča. Uočimo da, kad brzina svjetlosti ne bi bila konstantna nego bi se ponašala u skladu s našom intuicijom, utemeljenom na sporim loptama i snježnim grudama, promatrači na stanici složili bi se s onima u vlaku. Promatrač na stanici i dalje bi tvrdio da fotoni moraju prijeći dulji put do predsjednika Natragzemske nego do predsjednika Naprijedzemske. No, uobičajena intuicija implicira da bi se svjetlost koja se približava predsjedniku Natragzemske gibala brže, jer bi dobila "poticaj" od vlaka koji se giba prema

naprijed. Slično tome, ti promatrači vidjeli bi da se svjetlost koja se približava predsjedniku Naprijedzemske giba sporije jer je "zavlači" gibanje vlaka. Kad bi se uzelo u obzir te (nepostojeće) efekte, promatrači na stanici vidjeli bi da svjetlosne zrake dolaze do obojice predsjednika u istom trenutku. No, u stvarnome svijetu svjetlost ne ubrzava niti usporava, ne može je se pogurnuti niti povući. Promatrači na stanici stoga bi s pravom ustvrdili da je svjetlost prvo došla do predsjednika Naprijedzemske.

Konstantnost brzine svjetlosti zahtijeva da odbacimo drevni pojam da je istovremenost univerzalni pojam o kojemu se slažu svi, bez obzira na svoje stanje gibanja. Univerzalni sat, o kojemu se prije smatralo da bestrasno otkucava identične sekunde i ovdje na Zemlji i na Marsu i na Jupiteru i u galaksiji Andromeda i u svakom zakutku svemira – ne postoji. Naprotiv, promatrači u relativnom gibanju neće se složiti o tome koji se događaji događaju u isto vrijeme. Opet, razlog tome što nam je taj zaključak –

bona fide obilježje svijeta u kojemu živimo – tako stran, u tome je što su njegovi učinci ekstremno maleni kad je riječ o brzinama na kakve obično nailazimo u svom svakodnevnom iskustvu. Ako je pregovarački stol dugačak 30 metara, a vlak se giba brzinom od 16 kilometara na sat, promatrači na stanici "vidjeli" bi da je svjetlost došla do predsjednika Naprijedzemske oko milijuntinku milijardinke sekunde prije nego što je došla do predsjednika Natragzemske. Iako je ta razlika stvarna, ona je tako sićušna da je ljudska osjetila ne mogu izravno zapaziti. Kad bi se vlak gibao znatno brže, recimo 960 milijuna kilometara na sat, s gledišta promatrača na stanici svjetlosti bi trebala gotovo 20 puta više vremena da dospije do predsjednika Natragzemske nego što bi joj trebalo da dođe do predsjednika Naprijedzemske. Pri velikim brzinama zaprepašćujući efekti specijalne relativnosti postaju sve izraženiji.

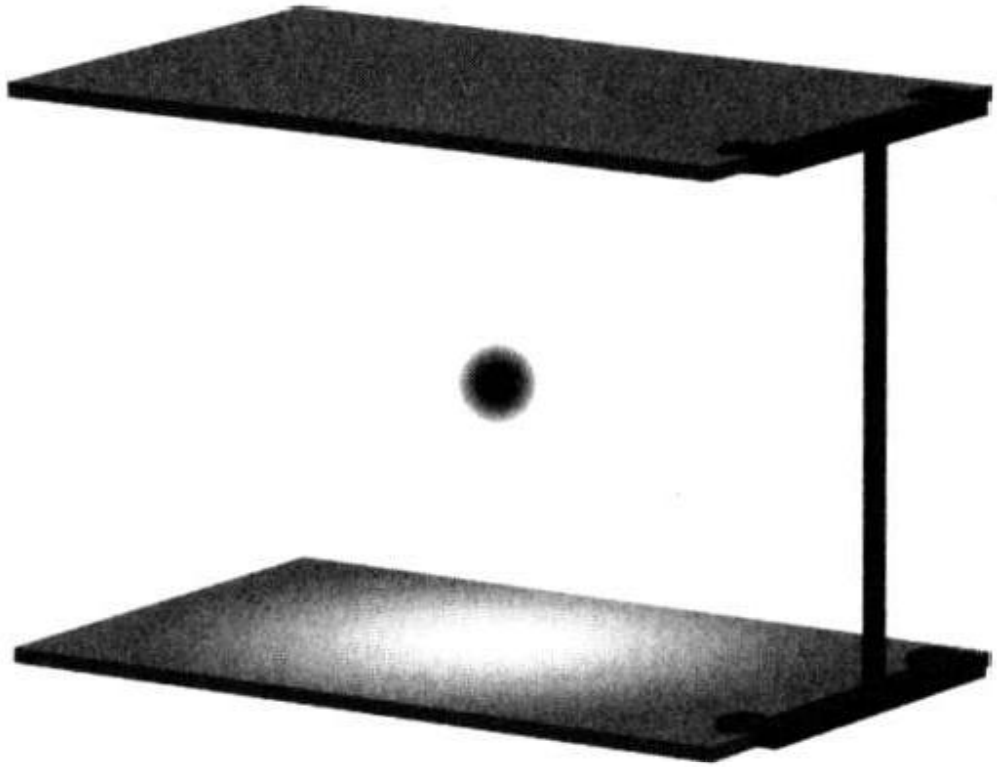
Učinak na vrijeme: drugi dio

Teško je dati apstraktnu definiciju vremena – pokušaji da se to učini često završavaju pozivanjem upravo na sam pojam "vremena", ili se to pak izbjegava raznim jezičnim akrobacijama. Umjesto da pođemo tim putem, mogli bismo zauzeti pragmatično stajalište i definirati vrijeme kao ono što mjere satovi. Naravno, tako bismo prenijeli teret definicije na pojam "sat"; tu možemo privremeno shvatiti sat kao uređaj koji prolazi kroz savršeno ciklične cikluse gibanja. Vrijeme ćemo mjeriti brojeći cikluse kroz koje prolazi naš sat. Svima poznata štoperica zadovoljava tu definiciju; ima kazaljke koje se gibaju pravilnim ciklusima i doista mjerimo proteklo vrijeme brojeći krugove (ili njihove razlomke) koje kazaljke opišu između odabranih događaja.

Naravno, značenje "savršeno pravilnih ciklusa gibanja" implicitno uključuje pojam vremena, jer se "pravilno" odnosi na jednake odsječke vremena protekle u svakom ciklu-

su. S praktičnog stajališta to rješavamo izrađujući satove od jednostavnih fizičkih komponenti od kojih očekujemo da prolaze kroz ponavljajuće ciklične razvoje koji se ne mijenjaju od ciklusa do ciklusa. Jednostavni primjeri su djedovi satovi s klatnima koja se njišu lijevo-desno i atomski satovi utemeljeni na ponavljajućim atomskim procesima.

Cilj nam je da razumijemo kao gibanje utječe na protok vremena, a budući da smo vrijeme definirali operativno, putem satova, svoje pitanje možemo prevesti u pitanje kako gibanje utječe na "otkucavanje" satova. Presudno je da na početku naglasimo da se naša rasprava ne odnosi na to kako mehanički elementi pojedinog sata reagiraju na trešnju i ljuljanje kao rezultat neudobnog putovanja. Zapravo, razmotrit ćemo samo najjednostavnije i najvedrije gibanje – gibanje apsolutno konstantnom brzinom – i stoga u našem putovanju uopće neće biti nikakve trešnje ni ljuljanja. Umjesto toga, zanima nas univerzalno pitanje kako gibanje



Slika 2.1 Svjetlosni sat sastoji se od dvaju paralelnih zrcala, s fotonom koji titra između njih. Sat "otkucava" svaki put kad foton obavi putovanje tamo i natrag.

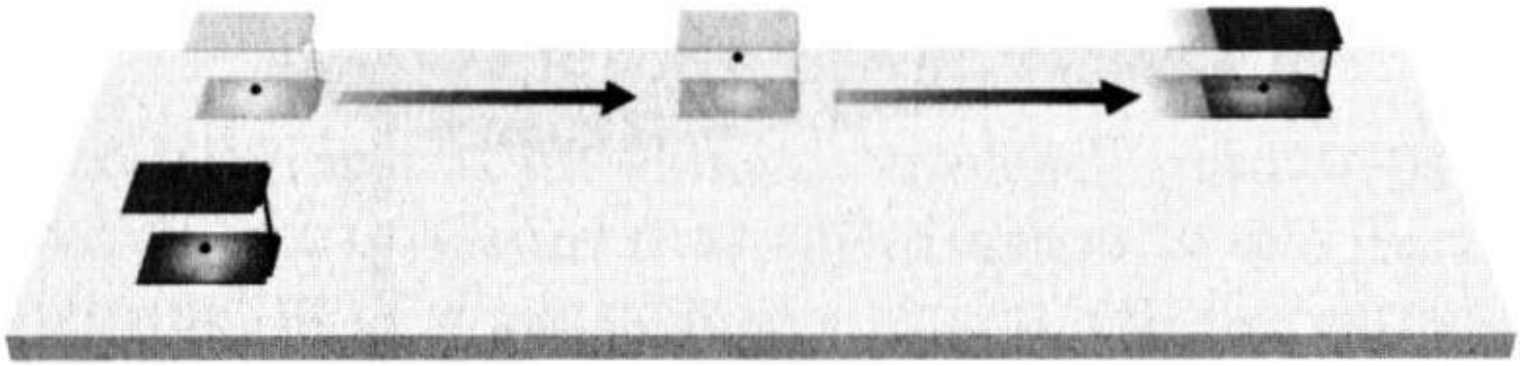
utječe na protok vremena te stoga kako ono u osnovi utječe na *sve* satove, bez obzira na njihovu građu i konstrukciju.

U tu svrhu predstavljamo najjednostavniji (ali najmanje praktičan) sat na svijetu. Poznat je kao "svjetlosni" sat i sa-

stoji se od dvaju malenih zrcala montiranih na okviru, jedno prema drugome, a između njih titra jedan foton svjetlosti (vidi sliku 2.1). Ako su zrcala udaljena oko 15 centimetara, fotonu će trebati oko milijardinke sekunde za put tamo i natrag. "Otkucaj" svjetlosnog sata može se shvatiti kao jedno putovanje fotona tamo i natrag – milijardu otkucaja znači da je protekla jedna sekunda.

Svjetlosni sat možemo iskoristiti kao štopericu za mjerenje vremena proteklog između događaja: jednostavno ćemo brojiti koliko otkucaja prođe u razdoblju koje nas zanima i pomnožimo ga s vremenom koje odgovara jednom otkucaju. Na primjer, ako mjerimo utrku konja i izbrojimo da je između starta i finiša foton obavio 55 milijardi putovanja, možemo zaključiti da je utrka trajala 55 sekundi.

Razlog zašto se u svojoj raspravi služimo svjetlosnim satom u tome je što zbog svoje mehaničke jednostavnosti ne sadrži suvišne pojedinosti te nam stoga pruža najjasniji

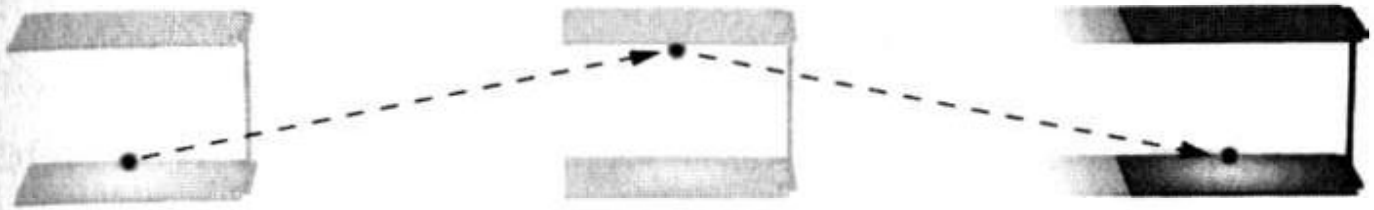


Slika 2.2 Nepokretni svjetlosni sat u prvom planu, dok drugi svjetlosni sat prolazi iza njega stalnom brzinom.

uvid u to kako gibanje utječe na protok vremena. Da bismo to vidjeli, zamislimo da opušteno promatramo tok vremena gledajući otkucavanje svjetlosnog sata na obližnjem stolu. A tada, iznenada, na stol uklizi drugi svjetlosni sat koji se giba stalnom brzinom (vidi sliku 2.2). Postavljamo pitanje: hoće li pokretni svjetlosni sat otkucavati istim tempom kao i nepokretni svjetlosni sat?

Da bismo odgovorili na to pitanje, pogledajmo put koji, s našega gledišta, mora prijeći foton u pokretnom satu kako bi načinio otkucaj. Foton načinje u osnovi pokretnoga sata, kao

načinio otkucaj. Foton počinje u osnovi pokretnoga sata, kao što je prikazano na slici 2.2, i prvo dolazi do gornjega zrcala. Budući da se, s našega gledišta, sat giba, foton mora putovati pod kutom, kao što je prikazano na slici 2.3. Da foton nije išao tom putanjom, promašio bi gornje zrcalo i odletio u svemir. Budući da pokretni sat ima svako pravo ustvrditi da je on nepokretan a sve ostalo se giba, znamo da foton *hoće* pogoditi gornje zrcalo i stoga je putanja koju smo nacrtali ispravna. Foton se odbija od gornjeg zrcala i opet se giba dijagonalnom putanjom kako bi pogodio donje zrcalo, i pokretni sat zabilježi otkucaj. Jednostavna ali bitna poanta u tome je da je dvostruka dijagonalna putanja kojom, kako vidimo, prolazi foton, *dulja* od izravne, okomite putanje kojom putuje foton u nepokretnom satu; osim što mora prevaliti okomitu udaljenost, foton u pokretnom satu s našega gledišta mora se gibati i udesno. Štoviše, konstantnost brzine svjetlosti kazuje nam da foton u pokretnom satu putuje posve jednakom brzinom kao i foton u nepokretnom satu. No budući da mora prevaliti



Slika 2.3 S našega gledišta, foton u pokretnom satu putuje dijagonalnom putanjom.

veću udaljenost kako bi ostvario otkucaj, otkucavat će *manje često*. Taj jednostavni argument određuje da pokretni svjetlosni sat, s našega gledišta, otkucava sporije od nepokretnog svjetlosnog sata. A budući da smo se složili da broj otkucaja izravno odražava koliko je vremena prošlo, vidimo da se prolaženje vremena usporilo za pokretni sat.

Možda ćete pomisliti da to odražava samo neko osobito svojstvo svjetlosnih satova i da ne bi vrijedilo za djedov sat s klatnom niti za Rolex. Bi li se vrijeme usporilo i kad bismo ga mjerili tim, poznatijim nam satovima? Odgovor je odlučno *da*, što se može vidjeti primjenom principa relativnosti.

Pričvrstimo Rolex na vrh naših svjetlosnih satova i ponovno izvedimo prethodni eksperiment. Kao što smo raspravili, nepokretni svjetlosni sat i na njega pričvršćen Rolex mjere identične vremenske odsječke, pri čemu milijardu otkucaja na svjetlosnom satu odgovara jednoj sekundi proteklog vremena na Rolexu. Ali što je s pokretnim svjetlosnim satom i na njega pričvršćenim Rolexom? Da li tempo otkucavanja pokretnog Rolexa usporava tako da ostane sinkroniziran sa svjetlosnim satom na koji je pričvršćen? Pa, da bismo najočitije dokazali svoju tvrdnju, zamislimo da se kombinacija svjetlosnog sata i Rolexa giba zato što je zakovana na pod odjeljka u vlaku bez prozora koji konstantnom brzinom klizi po savršeno ravnim i glatkim tračnicama. Po načelu relativnosti, promatrač na tom vlaku nikako ne može otkriti nikakav utjecaj gibanja vlaka. Ali kad svjetlosni sat i Rolex više ne bi bili sinkronizirani, to bi doista bio primjetan utjecaj. I zato pokretni svjetlosni sat i na njega pričvršćen Rolex *moraju* i dalje mjeriti jednake vremenske odsječke;

Rolex *mora* usporiti upravo na jednak način kao i svjetlosni sat. Bez obzira na marku, vrstu i konstrukciju, satovi koji se gibaju u odnosu jedan na drugoga bilježe protok vremena različitim tempom.

U toj raspravi o svjetlosnim satovima postaje jasno i da precizna vremenska razlika između nepokretnih i pokretnih satova ovisi o tome koliko dalje foton u pokretnom satu mora putovati kako bi dovršio svaki put tamo i natrag. To pak ovisi o tome koliko brzo se pokretni sat giba – s gledišta nepokretnog promatrača, što se brže sat giba, to dalje foton mora putovati udesno. Zaključujemo da, u usporedbi s nepokretnim satom, tempo otkucavanja pokretnog sata postaje tim sporiji što se brže giba.[3]

Da bismo dobili dojam o razmjerima, uočimo da foton obavi jedno putovanje tamo i natrag za oko milijardinku

---

[3] Za matematički obrazovanog čitatelja napominjemo da se te opservacije mogu pretvoriti u kvantitativne iskaze. Na primjer, ako

pokretni svjetlosni sat ima brzinu v i ako njegovu fotonu treba t sekundi da obavi povratno putovanje (prema mjerenju našeg stacionarnog svjetlosnog sata), onda će svjetlosni sat prevaliti udaljenost vt kad se njegov foton vrati do nižeg zrcala. Sada možemo primijeniti Pitagorin poučak da izračunamo da duljina oba dijagonalna puta na slici 2.3 iznosi $\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$, gdje je h udaljenost između dvaju zrcala svjetlosnog sata (koja u tekstu iznosi šest inča). Dvije dijagonalne putanje, uzete zajedno, stoga imaju duljinu $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$. Budući da brzina svjetlosti ima konstantnu vrijednost, koja se po konvenciji označava c, svjetlosti treba $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$ sekundi da obavi dvostruko dijagonalno putovanje. I tako, imamo jednakost $t=2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}/c$, što se može riješiti za t, pa dobijemo $t=\sqrt{c^2 - v^2}$. Da bismo izbjegli zbrku, napišimo to kao $t_{\text{pokretan}} = 2h/\sqrt{c^2 - v^2}$, gdje indeks znači da je to vrijeme koje izmjerimo od jednog do drugog otkucaja pokretnog sata. S druge strane, vrijeme za jedan otkucaj na stacionarnom satu je $t_{\text{stacionaran}} = 2h/c$ i, nakon malo algebarskih transformacija, $t_{\text{pokretan}} = t_{\text{stacionaran}} / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, što izravno pokazuje da jedan otkucaj na pokretnom satu traje dulje od jednog otkucaja na stacionarnom satu. To znači da će između odabranih događaja pokretni sat otkucati manje puta nego stacionarni sat, što znači da je za pokretnog promatrača proteklo manje vremena.

sekunde. Da bi sat mogao prevaliti znatniju udaljenost za vrijeme jednoga otkucaja, on stoga mora putovati neuobičajeno brzo – to jest, znatnijim dijelom brzine svjetlosti. Ako se giba uobičajenim brzinama, na primjer 16 kilometara na sat, udaljenost koju mora prijeći udesno prije nego obavi jedan otkucaj je beznačajna – samo oko 5 milijardinki metra. Dodatna udaljenost koju pokretni foton mora prevaliti sićušna je i ima odgovarajuće sićušan učinak na tempo otkucavanja pokretnoga sata. I opet, po načelu relativnosti, to vrijedi za sve satove – to jest za vrijeme samo. Zato bića poput nas, koja se gibaju jedna u odnosu na druga tako malenim brzinama, uglavnom nisu svjesna iskrivljenja u protoku vremena. Učinci, premda su nedvojbeno prisutni, nevjerojatno su maleni. No s druge strane, kad bismo mogli uhvatiti pokretni sat i gibati se s njim brzinom od, recimo, tri četvrtine brzine svjetlosti, po jednadžbama specijalne teorije relativnosti može se dokazati da bi nepokretni promatrači vidjeli da naš pokretni sat otkucava oko trećinu sporije od

njihovih. Doista, značajan učinak.

Život u trku

Vidjeli smo da konstantnost brzine svjetlosti implicira da pokretni svjetlosni sat otkucava sporije od nepokretnog svjetlosnog sata. A po principu relativnosti to mora vrijediti ne samo za svjetlosne satove nego i za sve satove – to mora vrijediti za vrijeme samo. Vrijeme protječe sporije za osobu koja se giba nego za nepokretnu osobu. Ako je prilično jednostavna logika koja nas je dovela do tog zaključka ispravna, onda, na primjer, zar ne bismo mogli živjeti dulje kad bismo se gibali nego kad bismo ostali nepokretni? Napokon, ako vrijeme protječe sporije za osobu u gibanju nego za onu koja miruje, onda taj disparitet ne bi trebao vrijediti samo za vrijeme kako ga mjere satovi nego i za vrijeme kako

ga mjere otkucaji srca i tjelesno propadanje. To i *jest* tako, kao što je i izravno potvrđeno – ali ne prosječnim životnim vijekom ljudi nego određenih čestica iz mikrosvijeta: miona. Ali, postoji i jedna važna kvaka koja nam ne dopušta da proglasimo kako smo pronašli izvor mladosti.

Dok miruju u laboratoriju, mioni dezintegriraju u procesu srodnom procesu radioaktivnog raspada, u prosjeku za dvije milijuntinke sekunde. Ta dezintegracija je eksperimentom potvrđena činjenica, potkrijepljena golemom količinom dokaza. To je kao da mion živi život s pištoljem na sljepoočnici; kad dospije u poodmaklu dob od dvije milijuntinke sekunde, potegne okidač i raspršise na elektrone i neutrine. No ako ti mioni ne miruju u laboratoriju nego se gibaju kroz uređaj poznat kao akcelerator čestica, koji ih ubrza gotovo do brzine svjetlosti, njihov prosječni životni vijek, kako ga mjere znanstvenici u laboratoriju, dramatično se produlji. To se *doista* događa. Pri brzini od 1,075 milijardi kilometara na sat (oko 99,5 posto brzine svjetlosti), životni

kilometara na sat (oko 99,5 posto brzine svjetlosti), životni vijek miona produlji se oko deset puta. Objašnjenje za to, prema specijalnoj relativnosti, glasi da "satovi" koje nose mioni otkucavaju mnogo sporije od satova u laboratoriju, pa dugo nakon što laboratorijski satovi kažu da bi mioni trebali potegnuti svoje okidače i eksplodirati, satovi na hitajućim mionima imaju još mnogo vremena do sudnjega dana. To je izravna i dramatična demonstracija učinka gibanja na protok vremena. Kad bi ljudi šibali okolo brzo poput tih miona, životni vijek porastao bi im također deseterostruko. Umjesto sedamdeset, ljudi bi živjeli sedamsto godina.[4]

---

[4] U slučaju da bi vas više uvjerio eksperiment proveden u manje ezoteričnom okolišu nego što je to akcelerator čestica, razmotrite sljedeće. U listopadu 1971. su J. C. Hafele, tada sa sveučilišta Washington u St. Louisu, i Richard Keating iz Mornaričke zvjezdarnice Sjedinjenih Država, ponijeli cezijske atomske satove i oko 40 sati s njima letjeli putničkim avionima. Nakon što se uračuna neznatne gravitacijske učinke (koje ćemo razmotriti u sljedećem poglavlju), specijalna teorija relativnosti trdi da bi ukupno proteklo vrijeme

A sada, kvaka. Iako promatrači u laboratoriju vide da hitajući mioni žive mnogo dulje od svoje nepokretne braće, to je zato što *vrijeme protječe sporije* za mione u gibanju. To usporavanje vremena ne vrijedi samo za satove koje nose mioni nego i za sve aktivnosti kojima bi se mogli poželjeti baviti. Na primjer, ako nepokretni mion može u svom kratkom životu pročitati 100 knjiga, njegov ekspresni rođak također će stići pročitati istih 100 knjiga, jer iako se čini da živi dulje od mirujućeg miona, njegov tempo čitanja – kao i sve ostalo u životu – također se usporava. Iz perspektive laboratorija, to je kao da pokretni mion živi svoj život u usporenom filmu; s toga gledišta pokretni mion će živjeti dulje od mirujućeg, ali "količina života" koji će taj mion doživjeti potpuno je jednaka. Naravno, isti zaključak vrijedi i za ljude u pokretu, sa životnim vijekom od nekoliko stoljeća. Iz njihove perspektive, život će običnim životom. Iz naše perspektive, oni žive u ekstremno usporenom filmu i stoga se njihov normalni životni vijek proteže preko tako dugačkog trajanja *našeg* vremena.

Ma tko se uopće giba?

Relativnost gibanja u isti mah je ključ za razumijevanje Einsteinove teorije i potencijalan uzrok pometnje. Možda ste primijetili da obrat perspektive mijenja uloge "pokretnih" miona, o čijim satovima smo argumentirali da otkucavaju sporije, i njihovih "nepokretnih" rođaka. Kao što i George i Gracie imaju jednako pravo objaviti da miruju i da se onaj drugi giba, tako i mioni koje smo opisali kao pokretne imaju puno pravo objaviti da, iz njihove perspektive, oni miruju, a da se "mirujući" mioni gibaju, u suprotnom smjeru. Izloženi argumen-

---

na pokretnim atomskim satovima trebalo biti manje od vremena na stacionarnim satovima, i to za nekoliko stotina milijardinki sekunde. Hafele i Keating pronašli su upravo to: vrijeme se *doista usporava* na pokretnom satu.

ti mogu se jednako opravdano primijeniti iz te perspektive, što vodi do naizgled suprotnog zaključka da satovi koje nose mioni koje smo proglasili mirujućima otkucavaju sporije od onih koje nose mioni koje smo opisali kao pokretne.

Već smo se susreli sa situacijom, ceremonijom potpisivanja sa žaruljom, u kojoj različita gledišta vode do rezultata koji se čine kao da su proturječni. U tom slučaju, osnovna logika specijalne relativnosti prisilila nas je da odbacimo uvriježeno shvaćanje da se svi, bez obzira na stanje gibanja, slažu u vezi s tim koji se događaji zbivaju u istom trenutku. No, čini se da je ovo novo proturječje još gore. Kako mogu oba promatrača tvrditi da sat onoga drugoga otkucava sporije? Dramatičnije rečeno, različite, ali jednako valjane mionske perspektive kao da nas navode na zaključak da će obje grupe tvrditi, odlučno ali s tugom, da će upravo oni umrijeti prvi. Doznajemo da svijet može imati neka neočekivano čudna svojstva, ali ipak se nadamo da ona ne prelaze u carstvo logičke apsurdnosti. Što se to događa?

stvo logičke apsurdnosti. Što se to događa?

Kao što vrijedi za sve prividne paradokse koji proizlaze iz specijalne relativnosti, kad pobliže istražimo te logičke dileme, one se razrješuju i otkrivaju nam nove spoznaje o tome kako univerzum funkcionira. Da bismo izbjegli još ozbiljnije antropomorfiziranje, ostavimo mione i vratimo se Georgeu i Gracie, koji sada, osim svojih baterijskih svjetiljaka, imaju i digitalne satove na svojim skafanderima. Iz Georgeove perspektive, on miruje, a Gracie se pojavljuje u daljini sa svojom titravom zelenom svjetiljkom i velikim digitalnim satom i prolazi pokraj njega u tami svemira. George uočava da Gracien sat otkucava sporo u usporedbi s njegovim (pri čemu stopa usporavanja ovisi o tome koliko brzo prolaze jedno pokraj drugoga). Da je malo pažljiviji, primijetio bi i da, osim brzine prolaženja vremena na njenom satu, i sve drugo na Gracie se odvija kao u usporenom filmu – način kako maše dok prolazi, brzina kojom trepće i tako dalje. Iz Graciene perspektive, posve iste primjedbe vrijede pak za Georgea.

Iako se to doima paradoksalnim, pokušajmo izvesti precizan eksperiment koji bi otkrio logički apsurd. Najjednostavnija mogućnost je da uredimo stvari tako da George i Gracie namjeste svoje satove na 12:00 u trenutku kad prolete jedno pokraj drugoga. Kako se budu udaljavali, oboje će tvrditi da sat onoga drugoga otkucava sporije. Da bi razriješili to neslaganje, George i Gracie moraju se ponovno sastati i izravno usporediti vrijeme koje je proteklo na njihovim satovima. No, kako bi to mogli učiniti? Pa, George ima raketnu naprtnjaču koju može upotrijebiti da iz svoje perspektive dostigne Gracie. No ako to učini, simetrija njihovih dviju perspektiva, koja je uzrok navodnog paradoksa, krši se jer će George biti podvrgnut ubrzanom, nejednolikom gibanju. Kad se tako sastanu, na Georgeovom satu će doista proći manje vremena jer će on tada moći definitivno reći da se gibao, jer je to osjećao. Georgeova i Graciena perspektiva više nisu jednake. Uključivši raketnu naprtnjaču, George se odrekao svoje tvrdnje da miruje.

Ako George na taj način krene prema Gracie, vremenska razlika koju će pokazati njihovi satovi ovisi o njihovoj međusobnoj brzini i o pojedinostima načina na koji se George služi svojom naprtnjačom. Kao što nam je već poznato, ako su brzine malene, razlika će biti neznatna. Ali ako je riječ o znatnijem dijelu brzine svjetlosti, razlika se može mjeriti minutama, danima, godinama, stoljećima, pa i još duljim vremenom. Kao konkretan primjer, zamislimo da je relativna brzina Georgea i Gracie kada prolaze jedno pokraj drugoga 99,5% brzine svjetlosti. Nadalje, recimo da George čeka tri godine, prema svome satu, i onda uključi raketnu naprtnjaču koja ga jednim mlazom pošalje prema Gracie istom brzinom kojom su se prije toga odmicali, 99,5% brzine svjetlosti. Kad dođe do Gracie, na njegovom satu proći će šest godina jer će mu trebati tri godine da je dostigne. Međutim, matematika specijalne relativnosti pokazuje da će na njenom satu proteći šezdeset godina. To nije nikakav

mađioničarski trik: Gracie će morati pretražiti svoja davna sjećanja ne bi li se sjetila da je prije šezdeset godina prošla pokraj Georgea u svemiru. S druge strane, za Georgea to je bilo prije samo šest godina. U stvarnome smislu, gibanje je pretvorilo Georgea u vremenskog putnika, iako u vrlo preciznom smislu: otputovao je u Gracienu budućnost.

Ponovno približiti dva sata radi izravne usporedbe možda se doima poput logističkog problema, ali upravo to je srž stvari. Možemo zamisliti mnoštvo trikova kojima bismo zaobišli tu napuklinu u oklopu paradoksa, ali svi se na kraju izjalove. Na primjer, umjesto da ponovno približimo satove, što ako George i Gracie usporede satove putem mobitela? Kad bi takva komunikacija bila trenutna, suočili bismo se s nepremostivom nedosljednošću: razmišljajući iz Graciene perspektive, Georgeov sat otkucava sporo i stoga on mora izvijestiti o manje protekla vremena; razmišljajući iz Georgeove perspektive, Gracien sat otkucava sporo i stoga ona mora izvijestiti o manje protekla vremena. Ne mogu oboje

imati pravo. Naravno, ključno u toj priči je da mobiteli ne prenose signale trenutno, što vrijedi za sva sredstva za komunikaciju. Mobiteli funkcioniraju na osnovi radiovalova, koji su vrsta svjetlosti, pa signal koji prenose putuje brzinom svjetlosti. To znači da je potrebno vrijeme da signal bude primljen – zapravo, upravo toliko vremena da jedna perspektiva bude kompatibilna s drugom.

Pogledajmo to prvo iz Georgeove perspektive. Zamislimo da svakoga sata, na puni sat, George u svoj mobitel izrecitira: "Dvanaest je sati i sve je u redu", "Jedan je sat i sve je u redu" i tako dalje. Budući da iz njegove perspektive Gracien sat otkucava sporo, u prvi mah pomislit će da će Gracie primiti te poruke prije nego što njen sat otkuca puni sat. Stoga, zaključuje on, Gracie će se morati složiti da je njen sat spor. Ali tada promisli još jedanput: "Budući da se Gracie udaljava od mene, signal koji joj šaljem mobitelom mora prevaliti sve veću udaljenost da je dosegne. Možda to dodatno vrije-

me putovanja kompenzira sporost njezina sata." Georgeova spoznaja da postoje suprotni učinci – sporost Graciena sata nasuprot vremenu putovanja njegova signala – potiče ga da zagrije stolicu i izračuna njihov ukupan učinak. Njegov rezultat glasi da učinak vremena putovanja *više nego nadoknađuje* sporost Graciena sata. Dolazi do iznenađujućeg zaključka da će Gracie primiti njegove signale koji proglašavaju puni sat tek nakon što taj isti sat otkuca na njezinu satu. Štoviše, George zna da je Gracie izvrsna fizičarka, zna da će uračunati vrijeme putovanja signala kad bude donosila zaključke o *njegovu* satu na temelju njegovih poziva mobitelom. Dodatno računanje pokazuje da čak i kad uračuna vrijeme putovanja, Graciena analiza njegovih signala navest će je na zaključak da Georgeov sat otkucava sporije od njezinog.

Posve ista logika vrijedi kad razmotrimo Gracienu perspektivu – kad ona svaki sat vremena šalje signale Georgeu. Isprva je sporost Georgeova sata navodi da misli kako će on svaki sat primati njezine poruke prije nego što pošalje svoje.

Ali kad uračuna sve veću udaljenost koju njen signal mora prevaliti kako bi dosegnuo Georgea koji odlazi u tamu, shvaća da će ih George zapravo dobiti *nakon* što pošalje svoje. I opet, ona shvaća da čak i ako George uračuna vrijeme putovanja, na temelju Gracienih poziva mobitelom zaključit će da njezin sat otkucava sporije od njegovog.

Sve dok ni George ni Gracie ne ubrzavaju, njihove perspektive su posve jednake. Premda se to doima paradoksalnim, tako oboje shvaćaju da je logički posve neproturječno da oboje misle kako sat onoga drugoga otkucava sporije.

Učinak gibanja na prostor

Prethodna rasprava otkriva nam da promatrači vide da pokretni satovi otkucavaju sporije od njihovih vlastitih – naime, gibanje utječe na vrijeme. Odatle je kratak korak do

spoznaje da gibanje jednako dramatično utječe i na prostor. Vratimo se Slimu i Jimu na trkačkoj pisti. Kao što smo spomenuli, u salonu automobila Slim je krojačkim metrom pomno izmjerio duljinu svog novog auta. Dok Slim hita pistom, Jim ne može primijeniti tu metodu da izmjeri duljinu auta, pa se mora poslužiti neizravnim postupkom. Jedan takav pristup, kao što smo ranije naznačili, sastoji se u sljedećem: Jim pokrene svoju štopericu u trenutku kad prednji odbojnik automobila dođe do njega, a zaustavi je čim prođe stražnji odbojnik. Pomnoživši proteklo vrijeme s brzinom auta, Jim može odrediti duljinu auta.

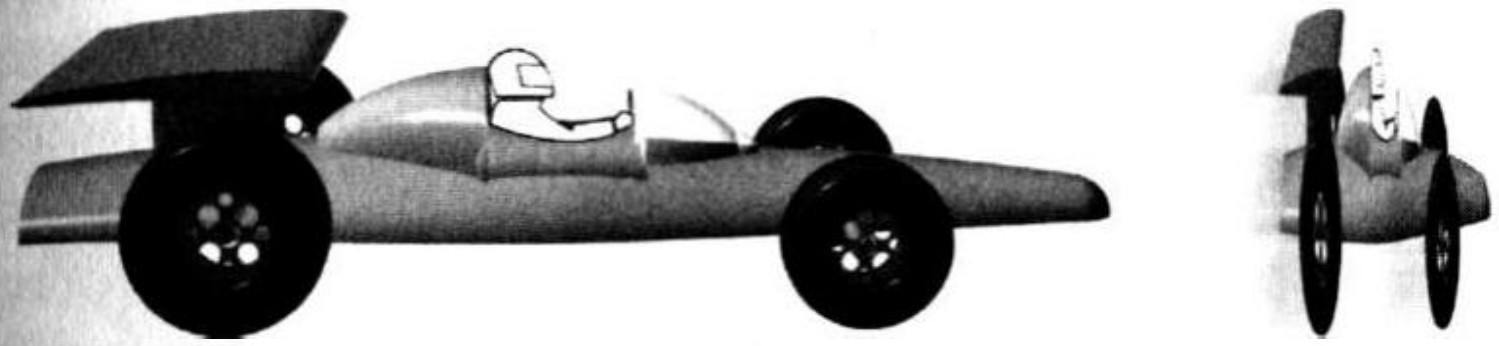
Posluživši se svojim novim spoznajama o istančanostima vremena, shvaćamo da je Slim iz svoje perspektive nepomičan, a Jim se giba, te zato Slim vidi da je Jimov sat spor. Kao rezultat toga, Slim shvaća da će Jimovo neizravno mjerenje duljine auta dati *kraći* rezultat od onog izmjerenog u salonu, jer u Jimovom računu (duljina jednako brzina puta proteklo vrijeme) Jim mjeri proteklo vrijeme satom koji otkucava

sporo. Ako otkucava sporo, proteklo vrijeme koje izmjeri bit će manje i rezultat njegova računanja bit će manja duljina.

Tako će Jim percipirati duljinu Slimova automobila, kad je u gibanju, kao manju od njegove duljine izmjerene u mirovanju. To je primjer opće pojave da promatrači percipiraju pokretan predmet kao kraći uzduž smjera gibanja. Na primjer, jednadžbe specijalne relativnosti pokazuju da, ako se predmet giba brzinom od oko 98% brzine svjetlosti, onda će ga promatrač u mirovanju vidjeti kao 20% kraćeg nego kad bi mirovao. Ta pojava ilustrirana je na slici 2.4.[5]

---

[5] Iako slika 2.4 korektno ilustrira smanjivanje predmeta duž smjera njegova gibanja, ona ne ilustrira ono što bismo zapravo vidjeli kad bi neki predmet nekako prohujao pokraj nas gotovo brzinom svjetlosti (pod pretpostavkom da bi naše oči ili fotografska oprema uopće uspjeli nešto vidjeti!). Da bi nešto vidjele, naše oči – ili fotoaparat – moraju primiti svjetlost odraženu s površine tog predmeta. No budući da odražena svjetlost putuje do nas s raznih mjesta na tom predmetu, svjetlost koju vidimo u svakom trenutku došla je



Slika 2.4. Predmet u gibanju skraćuje se u smjeru svoga gibanja.

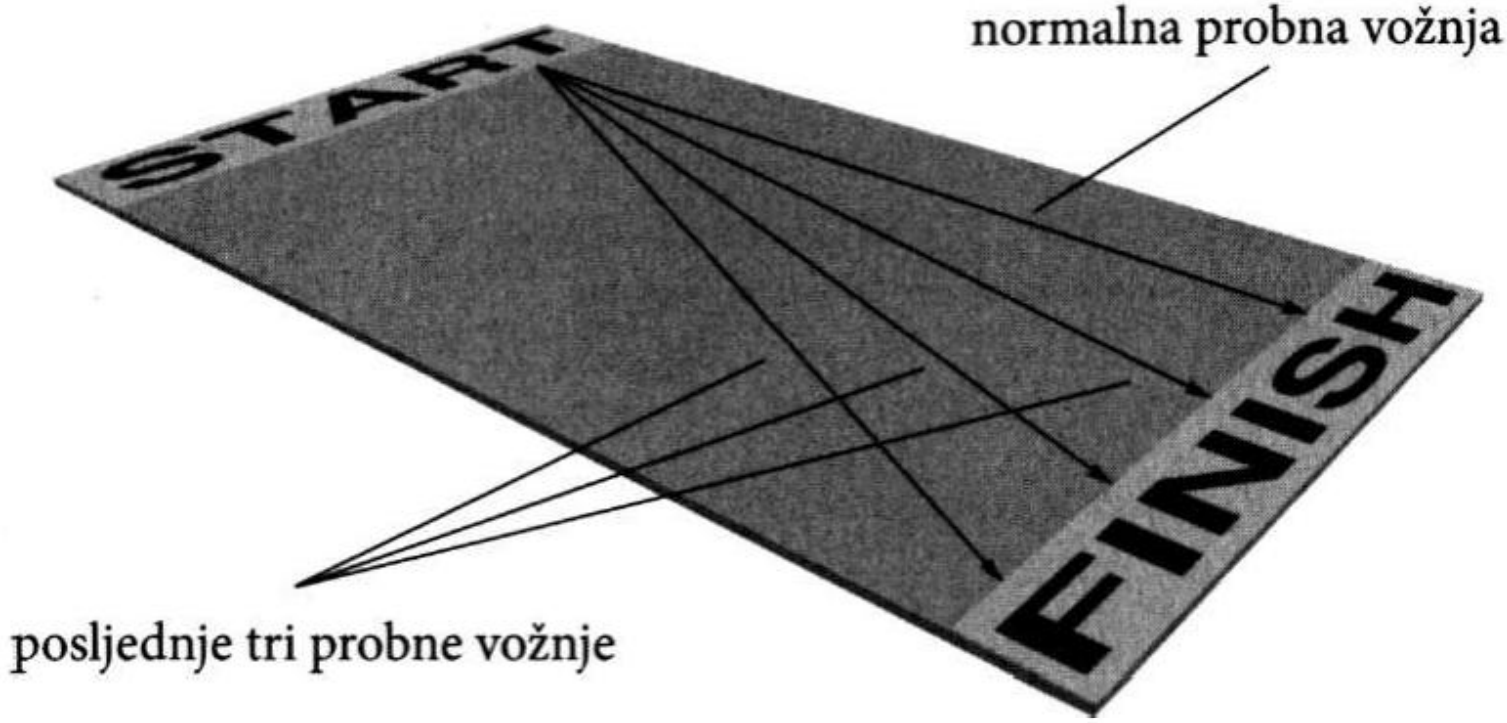
Gibanje kroz prostorvrijeme

Konstantnost brzine svjetlosti prouzročila je zamjenu tradicionalnog shvaćanja prostora i vremena kao krutih i objektivnih struktura novom koncepcijom u kojoj su oni blisko povezani s promatračem i promatranim. Tu bismo mogli završiti raspravu, shvativši da se pokretni predmeti gibaju kao u usporenom filmu i skraćuju se. No, specijalna relativnost nudi dublju, ujedinjenu perspektivu koja obuhvaća te pojave.

Da bismo razumjeli tu perspektivu, zamislimo prilično nepraktičan automobil koji hitro postiže svoju brzinu krstarenja od 160 kilometara na sat i održava tu brzinu, ni veću ni manju, dok ne ugasi motor i zaustavi se koturajući se. Zamislimo i da, zbog rastućeg ugleda vješta vozača, Slim bude angažiran da obavi probnu vožnju na dugačkoj, ravnoj i širokoj pisti usred ravne pustinje. Budući da je udaljenost između starta i cilja 16 kilometara, automobil bi trebao tu udaljenost prevaliti za desetinku sata, dakle za šest minuta. Jim, koji glumi autoinženjera, proučava podatke dobivene desecima probnih vožnji i uznemireno vidi da, iako su vožnje trajale većinom po šest minuta, nekoliko posljednjih bile su prilično dulje: 6,5, pa 7, pa čak i 7,5 minuta. Isprva posumnja na mehanički kvar, jer ta vremena naznačuju da

---

do nas putanjama različite duljine. Zbog toga nastaje svojevrsna relativistička iluzija u kojoj izgleda kao da je predmet i skraćen i zakrenut.



Slika 2.5 Zbog jarkoga kasnopopodnevnog sunca Slim je od starta do cilja vozio pod sve većim kutem.

je auto posljednje tri vožnje putovao sporije od 160 kilometara na sat. No nakon što je podrobno pregledao automobil, uvjerio se da je u savršenom stanju. Nesposoban objasniti ta nenormalno duga vremena, obraća se Slimu i pita ga o nekoliko posljednjih vožnji. Slim ima jednostavno objašnje-

nje. Kaže Jimu sljedeće: budući da se pista pruža u smjeru istok-zapad, kako se sunce spušta prema obzoru, počinje ga zaslijepljivati. Za vrijeme posljednjih triju vožnji bilo je tako neugodno da je od jednog do drugog kraja piste vozio pod blagim kutom. Priložio je i grubu skicu putanje kojom je vozio posljednje tri vožnje; prikazana je na slici 2.5. Objašnjenje za tri dulja vremena sada je posve jasno: putanja od starta do cilja dulja je kad se vozi pod kutom i stoga je, vozeći istom brzinom, potrebno više vremena da se stigne na cilj. Drukčije rečeno, vozeći pod kutom, dio brzine od 160 kilometrara na sat "potroši" se na gibanje od juga prema sjeveru, pa ostane malo manje za put od istoka prema zapadu. To znači da će biti potrebno malo dulje da se taj put prevali.

Kao što smo naveli, lako je razumjeti Slimovo objašnjenje; međutim, vrijedi ga pomalo preformulirati radi pojmovnog skoka koji ćemo izvesti. Smjerovi sjever-jug i istok-zapad su dvije neovisne prostorne dimenzije u kojima se automobil

može gibati. (Može se gibati i vertikalno, na primjer kad prelazi planinski prijevoj, ali ta nam sposobnost ovdje neće trebati.) Slimovo objašnjenje ilustrira da, iako je automobil svaki put putovao brzinom od 160 kilometara na sat, u posljednjih nekoliko vožnji tu je brzinu podijelio na dvije dimenzije i stoga se činilo da je sporiji od 160 kilometara na sat u smjeru istok-zapad. U prethodnim vožnjama svih 160 kilometara na sat bilo je posvećeno samo gibanju u smjeru istok-zapad; u posljednje tri, dio te brzine upotrijebljen je i za gibanje u smjeru sjever-jug.

Einstein je otkrio da je upravo ta zamisao – podjela gibanja na različite dimenzije – u osnovi cjelokupne impresivne fizike specijalne relativnosti, ako shvaćamo da gibanje objekta ne dijele samo prostorne dimenzije, nego u tom gibanju može sudjelovati i *vremenska* dimenzija. Zapravo, u većini okolnosti, većina gibanja objekta je gibanje kroz vrijeme, a ne kroz prostor. Pogledajmo što to znači.

Gibanje kroz prostor pojam je koji naučimo u ranom dje-

tinjstvu. Iako ne razmišljamo često na taj način, svjesni smo da se mi, naši prijatelji, naše stvari i sve ostalo *gibamo i kroz vrijeme*. Kad pogledamo na sat ili ručni sat, čak i kad samo sjedimo i gledamo televiziju, očitavanje na satu neprekidno se mijenja, neprekidno "ide naprijed kroz vrijeme". Mi starimo, kao i sve oko nas, neizbježno prelazimo iz jednoga trenutka u drugi. Zapravo, matematičar Herman Minkowski, a uostalom i Einstein, zagovarali su da se o vremenu razmišlja kao o još jednom dimenziji univerzuma – četvrtoj dimenziji – koja je u nekim aspektima slična trima prostornim dimenzijama u koje smo uronjeni. Premda zvuči apstraktno, pojam vremena kao dimenzije zapravo je konkretan. Kad se želimo sastati s nekim, kažemo mu gdje "u prostoru" očekujemo da ćemo ga vidjeti – na primjer, na devetom katu zgrade na uglu 53. ulice i 7. avenije. Tu su tri informacije (deveti kat, 53. ulica, 7. avenija) koje definiraju konkretnu lokaciju u trima prostornim dimenzijama univerzuma. No jednako

je važno odrediti *kada* očekujemo da ćemo se sastati s njim – na primjer, u 3 sata poslije podne. Ta nam informacija kazuje gdje "u vremenu" će se dogoditi naš sastanak. Dakle, događaje određuju *četiri* informacije: tri o prostoru i jedna o vremenu. Kažemo da ti podaci određuju lokaciju događaja u prostoru i u vremenu, ili ukratko, u *prostorvremenu*. U tom smislu, vrijeme jest još jedna dimenzija.

Budući da su prema tom gledištu prostor i vrijeme naprosto razni primjeri dimenzija, možemo li govoriti o brzini predmeta kroz vrijeme na sličan način kao o pojmu brzine kroz prostor? Možemo.

Važna naznaka o tome kako to možemo nalazi se u glavnom dijelu informacije koju već znamo. Kad se predmet giba kroz vrijeme u odnosu na nas, njegov sat otkucava sporije u usporedbi s našim. Naime, brzina njegova *gibanja kroz vrijeme smanjuje se*. Sada dolazi na red pojmovni skok: Einstein je proglasio da svi predmeti u univerzumu *uvijek* putuju kroz prostorvrijeme jednom, nepromjenjivom brzi-

nom – brzinom svjetlosti. To je neobična pomisao; navikli smo na shvaćanje da se predmeti gibaju brzinama znatno manjima od brzine svjetlosti. Više puta smo naglasili da je to razlog zašto su relativistički učinci tako neuobičajeni u svakodnevnom svijetu. Sve je to točno. Ali sada govorimo o kombiniranoj brzini predmeta kroz sve četiri dimenzije – tri prostorne i jednu vremensku – a brzina predmeta u tom generaliziranom smislu jednaka je brzini svjetlosti. Da bismo to potpunije razumjeli i otkrili koliko je to važno, uočimo da se, kao kod gore spomenutog nepraktičnog automobila koji vozi samo jednom brzinom, ta fiksirana brzina može raspodijeliti na različite dimenzije – naime, na različite prostorne *i* na vremensku dimenziju. Ako objekt miruje (u odnosu na nas), dakle uopće se ne giba kroz prostor, onda se prema analogiji s prvim vožnjama automobila, cjelokupno gibanje predmeta koristi za putovanje kroz jednu dimenziju – u ovom slučaju, vremensku dimenziju. Štoviše, svi predmeti

koji miruju u odnosu na nas i jedni prema drugima gibaju se kroz vrijeme – stare – posve istom stopom ili brzinom. No ako se predmet giba kroz prostor, to znači da se dio prethodnog gibanja kroz vrijeme mora preusmjeriti. Poput automobila koji vozi pod kutom, to raspodijeljeno gibanje znači da će se predmet gibati kroz vrijeme sporije od svojih nepomičnih parnjaka, jer dio njegova gibanja sada služi za gibanje kroz prostor. Naime, njegov sat otkucavat će sporije ako se giba kroz prostor. Upravo to smo i ranije zaključili. Sada vidimo da se vrijeme usporava kad se predmet giba u odnosu na nas jer to preusmjerava dio njegova gibanja kroz vrijeme u gibanje kroz prostor. Brzina predmeta kroz prostor stoga je tek odraz toga koliko njegova gibanja kroz vrijeme je preusmjereno.[6]

Vidimo i da taj okvir odmah uključuje i činjenicu da postoji granica prostorne brzine predmeta: maksimalna brzina kroz prostor ostvaruje se kad je *cjelokupno* gibanje predmeta kroz vrijeme preusmjereno u gibanje kroz prostor. To se

događa kad je cjelokupno njegovo gibanje brzinom svjetlosti kroz vrijeme preusmjereno u gibanje brzinom svjetlosti kroz prostor. No, budući da je iskoristio sve svoje gibanje kroz vrijeme, to je *najveća* brzina kroz prostor koju može postići predmet – bilo koji predmet. To je analogno našem automobilu u probnoj vožnji u smjeru sjever-jug. Kao što automobilu neće ostati nimalo brzine za gibanje u smjeru

---

6 Za matematički obrazovanog čitatelja napominjemo da s pozicije u prostorvemenu 4-vektor $x = (ct, x1, x2, x3) = (ct, \vec{x})$ možemo proizvesti 4-vektor $u=dx/d\,\tau$, gdje je τ pravo vrijeme definirano kao $d\tau = dt2 - c\text{-}2(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2)$. Tada, "brzina kroz prostorvrijeme" je magnituda 4-vektora $u, \sqrt{((c^2dt^2 - d\vec{x}^2)/(dt^2 - c^{-2}d\vec{x}^2))}$, što je identično brzini svjetlosti c. Sada možemo presložiti jednadžbu $c^2(dt/d\tau)^2$ tako da glasi $c^2(d\tau/dt)^2 + (d\vec{x}/dt)^2 = c^2$. To pokazuje da porast brzine objekta kroz prostor, $\sqrt{(d\vec{x}/dt)^2}$, mora biti praćen smanjenjem $d\tau/dt$, pri čemu je potonje brzina objekta kroz vrijeme (tempo koji vrijeme prolazi na njegovom vlastitom satu, $d\tau$, u usporedbi s vremenom na našem stacionarnom satu, dt).

istok-zapad, tako i onomu što se giba brzinom svjetlosti kroz prostor neće ostati nimalo brzine za gibanje kroz vrijeme. Zato svjetlost ne stari; foton koji je nastao u velikom prasku iste je starosti sada kao što bio tada. Pri brzini svjetlosti – vrijeme stoji.

A što je s $E = mc^2$?

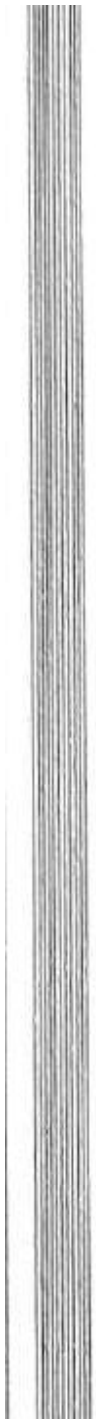
Iako Einstein nije želio da se njegova teorija naziva "teorijom relativnosti" (i umjesto toga predložio naziv "teorija invarijantnosti" kako bi izrazio nepromjenjivost brzine svjetlosti, između ostaloga), značenje tog pojma danas je jasno. Einsteinov rad pokazao je da su pojmovi poput prostora i vremena, koji su se nekoć doimali odvojenima i apsolutnima, zapravo isprepleteni i relativni. Einstein je nadalje dokazao da su i druga fizikalna obilježja svijeta također neočekivano isprepletena. Jedan od najvažnijih primjera toga

je njegova najslavnija jednadžba. U njoj Einstein tvrdi da energija (E) predmeta i njegova masa (m) nisu neovisni pojmovi; energiju možemo odrediti ako znamo masu (pomnoživši je dvaput brzinom svjetlosti, c^2), ili pak možemo odrediti masu ako znamo energiju (podijelivši je dvaput brzinom svjetlosti). Drugim riječima, energija i masa su konvertibilne valute – poput dolara i franaka. No za razliku od novca, tečaj koji određuju dva faktora brzine svjetlosti isti je uvijek i zauvijek. Budući da je taj faktor razmjene tako velik (c^2 je ogroman broj), malo mase može proizvesti golemu količinu energije. Svijet je shvatio razornu moć hirošimske bombe koja je nastala pretvorbom manje od jednog postotka jednog kilograma uranija u energiju; možda ćemo jednoga dana u fuzijskim elektranama produktivno iskorištavati Einsteinovu formulu kako bismo potrebe za energijom cijeloga svijeta zadovoljili onime čega imamo u gotovo beskonačnoj količini – morskom vodom.

S gledišta pojmova koje smo istaknuli u ovom poglavlju, Einsteinova jednadžba daje nam najkonkretnije objašnjenje presudne činjenice da se ništa ne može gibati brže od svjetlosti. Na primjer, možda ste se zapitali zašto ne možemo uzeti neki predmet, recimo mion koji je akcelerator ubrzao na 1073 milijuna kilometara na sat – 99,5% brzine svjetlosti – i "gurnuti ga malo jače", tako da postigne 99,9% brzine svjetlosti, a zatim ga "stvarno jako gurnuti" i natjerati ga da prijeđe brzinu svjetlosti. Einsteinova formula objašnjava zašto takvi pokušaji nikad ne bi uspjeli. Što se brže nešto giba, to više energije ima, a prema Einsteinovoj formuli vidimo da što više energije nešto ima, to postaje masivnije. Na primjer, mion koji se giba brzinom od 99,9% brzine svjetlosti mnogo je teži od svojih rođaka u mirovanju. Zapravo, točno je 22 puta teži – i to doslovno. (Mase navedene u tablici 1.1 vrijede za čestice u mirovanju.) No, što je predmet masivniji, teže mu je povećati brzinu. Gurati dijete na biciklu je jedno, a gurati cisternu nešto posve drugo. Dakle, kako

se mion sve brže giba, postaje sve teže dalje mu povećavati brzinu. Na 99,999% brzine svjetlosti masa miona povećala se više od 70 000 puta. Budući da se masa miona povećava bezgranično, bilo bi ga potrebno gurati *beskonačnom* količinom energije kako bi dosegnuo ili prešao svjetlosnu barijeru. Dakako, to je nemoguće i stoga apsolutno ništa ne može putovati brže od brzine svjetlosti.

Kao što ćemo vidjeti u sljedećem poglavlju, taj zaključak sije sjeme drugog velikog proturječja s kojim se fizika suočila u prošlom stoljeću i zapravo zapečaćuje sudbinu druge ugledne i omiljene teorije – Newtonove univerzalne teorije gravitacije.



TREĆE POGLAVLJE

O uvojima i mreškanju

Specijalnom teorijom relativnosti Einstein je razriješio sukob između "prastare intuicije" o gibanju i konstantnosti brzine svjetlosti. Ukratko, rješenje glasi da je naša intuicija pogrešna – nju oblikuje gibanje koje je obično krajnje polagano u usporedbi s brzinom svjetlosti, a tako male brzine prikrivaju istinski karakter prostora i vremena. Specijalna

teorija relativnosti otkriva njihovu prirodu i pokazuje da se radikalno razlikuju od prethodnih poimanja. No, miješati se u naše razumijevanje temelja prostora i vremena uopće nije bilo jednostavno. Einstein je ubrzo shvatio da je, od mnogih posljedica koje su proistekle iz otkrića specijalne teorije relativnosti, jedna posebno duboka: pravilo da ništa ne može nadmašiti brzinu svjetlosti pokazuje se neuskladivim s Newtonovom uglednom univerzalnom teorijom gravitacije, izloženom u drugoj polovici sedamnaestog stoljeća. I tako, riješivši jedno proturječje, specijalna relativnost stvorila je drugo. Nakon desetljeća intenzivnog, katkad i mučnog proučavanja, Einstein je razriješio dilemu svojom općom teorijom relativnosti. U toj teoriji Einstein je ponovno izveo revoluciju u našem razumijevanju prostora i vremena, pokazavši da se oni uvijaju i iskrivljuju i tako prenose gravitacijsku silu.

Newtonovo viđenje gravitacije

Isaac Newton, rođen 1642. u engleskoj pokrajini Lincolnshire, promijenio je lice znanosti uvevši matematiku punom snagom u službu fizikalnih istraživanja. Newtonov intelekt bio je tako monumentalan da, na primjer, kad je shvatio da matematika koja je potrebna za neka njegova istraživanja ne postoji, on ju je izumio. Proći će gotovo tri stoljeća prije nego što svijet dobije znanstvenoga genija usporedivih sposobnosti. Od svih Newtonovih dubokih uvida u funkcioniranje univerzuma ovdje nas prije svega zanima njegova univerzalna teorija gravitacije.

Sila teže prožima svakodnevni život. Ona nas i predmete oko nas pričvršćuje uz površinu Zemlje; sprečava da se zrak koji dišemo rasprši u svemir; drži Mjesec u orbiti oko Zemlje i Zemlju u orbiti oko Sunca. Gravitacija određuje ritam kozmičkoga plesa koji neumorno i pedantno izvode milijarde i milijarde stanovnika svemira, od asteroida i planeta

jarde i milijarde stanovnika svemira, od asteroida i planeta, preko zvijezda, do galaksija. Više od tri stoljeća Newtonova utjecaja navodi nas da uzimamo zdravo za gotovo da je jedna jedina sila – gravitacija – odgovorna za to bogatstvo zemaljskih i svemirskih događanja. No prije Newtona nitko nije shvatio da jabuka koja pada sa stabla svjedoči o istom fizikalnom načelu po kojemu se planeti vrte oko Sunca. Hrabrim korakom u službi znanstvene hegemonije, Newton je ujedinio fiziku tako da vlada i nebom i zemljom, objavivši da je gravitacija nevidljiva ruka na djelu i u jednom i u drugom carstvu.

Newtonovo viđenje gravitacije mogli bismo nazvati velikim ujednačavanjem. Objavio je da apsolutno sve djeluje privlačnom gravitacijskom silom na apsolutno sve drugo. Bez obzira na svoj fizički sastav, *sve* djeluje gravitacijskom silom i trpi je. Na temelju pomnog proučavanja analize gibanja planeta koju je izveo Johannes Kepler, Newton je zaključio da snaga gravitacijskog privlačenja između dva tijela

ovisi o upravo dvjema stvarima: količini tvari koja tvori ta tijela i udaljenosti između njih. "Tvar" znači materija – to obuhvaća ukupan broj protona, neutrona i elektrona, koji pak određuje *masu* predmeta. Newtonova univerzalna teorija gravitacije tvrdi da je jakost privlačenja između dva predmeta veća za predmete veće mase, a manja za predmete manje mase; tvrdi i da je jakost privlačenja veća za manje udaljenosti između predmeta, a manja za veće udaljenosti.

Newton je otišao mnogo dalje od tog kvalitativnog opisa i napisao jednadžbe koje kvantitativno opisuju jakost gravitacijske sile između dva predmeta. Izraženo riječima, te jednadžbe kazuju da je gravitacijska sila između dva tijela proporcionalna s umnoškom njihovih masa, a obratno proporcionalna s kvadratom udaljenosti između njih. Taj "zakon gravitacije" može služiti za predviđanje gibanja planeta i kometa oko Sunca, Mjeseca oko Zemlje i raketa koje kreću u svemirska istraživanja, kao i u ovozemaljske svrhe, poput računanja putanje bejzbolske lopte i akrobatskih

okreta skakača u vodu. Slaganje između predviđanja i uistinu opaženog gibanja takvih objekata nije ništa manje nego spektakularno. Taj uspjeh pružao je nedvosmislenu podršku Newtonovoj teoriji sve do početka dvadesetog stoljeća. Tada joj je Einsteinova specijalna teorija relativnosti postavila nepremostivu prepreku.

Neuskladivost Newtonove gravitacije i specijalne relativnosti

Glavno svojstvo specijalne teorije relativnosti je apsolutna granica brzine koju postavlja svjetlost. Važno je shvatiti da ta granica vrijedi ne samo za materijalne predmete nego i za signale i utjecaje svake vrste. Jednostavno ne postoji način da se prenese informacija ili kakav poremećaj s jednog mjesta na drugo brže od brzine svjetlosti. Naravno, svijet je pun

načina da se poremećaji prenesu *sporije* od brzine svjetlosti. Na primjer, vaš govor i svi drugi zvukovi prenose se titrajima koji putuju zrakom brzinom od oko 1130 kilometara na sat, što je doista slabašno u usporedbi sa svjetlosnih 1,080 milijardi kilometara na sat. Ta razlika u brzini postaje očita kad gledate bejzbolsku utakmicu sa sjedala koja su daleko od igrališta. Kad udarač mlatne loptu, zvuk dopre do vas nekoliko trenutaka *nakon* što vidite udarac. Slično se događa i u oluji. Iako munja i grom nastanu istovremeno, munju vidite prije nego što čujete grom. I to je odraz bitne razlike u brzini između zvuka i svjetlosti. Uspjeh specijalne relativnosti govori nam da obratna situacija, u kojoj signal dopre do nas prije svjetlosti koju emitira, naprosto nije moguća. Ništa ne može preteći fotone.

Evo u čemu je kvaka. U Newtonovoj teoriji gravitacije tijelo gravitacijski privlači drugo tijelo silom koju određuje samo masa tih predmeta i njihova udaljenost. Jakost nema nikakve veze s tim koliko dugo su ti predmeti jedan blizu

drugoga. To znači da, kad bi se promijenila njihova masa ili udaljenost, ti predmeti bi, prema Newtonu, *odmah* osjetili promjenu u međusobnom gravitacijskom privlačenju. Na primjer, Newtonova teorija gravitacije tvrdi da, kad bi Sunce odjednom eksplodiralo, Zemlja – daleko nekih 150 milijuna kilometara – odmah bi odstupila od svoje uobičajene eliptične orbite. Iako bi svjetlosti trebalo osam minuta da doputuje od Sunca do Zemlje, u Newtonovoj teoriji znanje da je Sunce eksplodiralo trenutno bi se prenijelo do Zemlje iznenadnom promjenom gravitacijske sile koja upravlja njezinim gibanjem.

Taj zaključak u izravnom je sukobu sa specijalnom relativnošću, jer ona sprečava da se informacije prenose brže od svjetlosti – trenutan prijenos krši taj propis u najvećoj mogućoj mjeri.

Dakle, početkom dvadesetog stoljeća Einstein je shvatio da je golem uspjeh Newtonove teorije gravitacije u sukobu

sa specijalnom teorijom relativnosti. Siguran u istinitost specijalne relativnosti, bez obzira na silnu podršku koju su eksperimenti davali Newtonovoj teoriji, Einstein je tražio novu teoriju gravitacije, koja bi se mogla uskladiti sa specijalnom teorijom relativnosti. To ga je na kraju dovelo do otkrića opće teorije relativnosti, koja je karakter prostora i vremena podvrgnula velikoj preobrazbi.

Einsteinova sretna misao

Još i prije otkrića specijalne relativnosti, Newtonova teorija gravitacije bila je manjkava u jednom važnom smislu. Iako se njome mogu davati vrlo precizna predviđanja o tome kako će se predmeti gibati pod utjecajem gravitacije, ona ne kaže ništa o tome što gravitacija jest. Naime, kako to da dva tijela koja su fizički odvojena jedno od drugoga, možda i stotinama milijuna kilometara, ako ne i više, ipak utječu

jedno na drugo? Kojim sredstvima gravitacija obavlja svoj posao? I sam Newton bio je svjestan da je to problem. Njegovim riječima:

> Nezamislivo je da neživa, sirova tvar, bez posredovanja čega drugoga, što nije tvarno, djeluje i utječe na drugu tvar bez uzajamna doticaja. Da Gravitacija bude urođena, inherentna i esencijalna za tvar tako da jedno tijelo djeluje na udaljenost na drugo, kroz vakuum, bez posredovanja čega drugoga, te da se tako njihovo djelovanje i sila prenosi s jednoga na drugo, to je po meni tako velika besmislica da vjerujem kako nitko tko je iole stručan u filozofskim pitanjima nikada ne bi ni pomislio na nju. Gravitaciju mora uzrokovati agens koji konstantno djeluje u skladu s određenim zakonima; no je li taj agens tvaran ili netvaran, to ću prepustiti mišljenju svojih čitatelja.[1]

---

[1] Isaac Newton, *Sir Isaac's Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, prev. A. Motte i Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), sv. I, str. 634.

Dakle, Newton je prihvatio postojanje gravitacije i razvijao jednadžbe koje precizno opisuju njezine učinke, ali nije ponudio nikakav uvid u to kako sve to zapravo funkcionira. Dao je svijetu "korisnički priručnik" za upotrebu gravitacije – upute koje fizičari, astronomi i inženjeri uspješno primjenjuju kad projektiraju putanje raketa prema Mjesecu, Marsu i drugim planetima, kako bi predvidjeli pomrčine Sunca i Mjeseca, putanje kometa i tako dalje. Ali, unutarnji mehanizam – sadržaj "crne kutije" gravitacije – ostavio je u potpunom mraku. Kad se služite gramofonom ili računalom, vjerojatno također nemate pojma kako oni funkcioniraju. Sve dok znate baratati opremom, ni vi ni itko drugi ne mora znati *kako* ona obavlja poslove koje ste joj namijenili. Ali ako vam se gramofon ili računalo pokvari, popravak ovisi o znanju o njihovom unutarnjem funkcioniranju. Slično tome, Einstein je shvatio da, usprkos stotinama godina eksperimentalnih potvrda, specijalna relativnost znači da je na neki istančan način Newtonova teorija "pokvarena", a

za njezin popravak potrebno je proučiti pitanje o istinskoj i potpunoj prirodi gravitacije.

Godine 1907, razmišljajući o tim pitanjima za svojim stolom u patentnom uredu u Bernu, u Švicarskoj, Einstein je došao do glavne spoznaje koja će ga, nakon pokušaja i pogrešaka, na kraju dovesti do radikalno nove teorije gravitacije – pristupa koji neće samo ispuniti prazninu u Newtonovoj teoriji nego će i iz korijena preformulirati razmišljanje o gravitaciji, a što je najvažnije, učinit će to ostajući dosljedna specijalnoj teoriji relativnosti.

Spoznaja do koje je Einstein došao relevantna je za pitanje koje vas je možda mučilo u poglavlju 2. Ondje smo istaknuli da želimo razumjeti kako se svijet čini osobama koje su u relativnom gibanju konstantnom brzinom. Pomno usporedivši opažanja tih osoba, našli smo neke dramatične implikacije za prirodu prostora i vremena. No što je s osobama koje su u *ubrzanom* gibanju? Opažanja tih osoba bit

će teže analizirati nego opažanja promatrača koji se neometano gibaju konstantnom brzinom, ali ipak možemo pitati postoji li neki način da ukrotimo tu zamršenost te i ubrzano gibanje obuhvatimo svojim novim razumijevanjem prostora i vremena.

Einsteinova "sretna misao" pokazala je put. Da bismo razumjeli tu spoznaju, zamislimo da je godina 2050, vi ste glavni stručnjak FBI-a za eksplozive i upravo ste primili grozničav poziv da istražite ono što je možda sofisticirana bomba usred Washingtona. Dohitali ste na poprište, pregledali uređaj i vidjeli da se ostvaruje vaša najgora noćna mora: bomba je nuklearna, i tako jaka da čak i kad bi bila zakopana duboko u koru Zemlje ili potopljena na dno oceana, štete od njene eksplozije bile bi katastrofalne. Oprezno ste proučili detonacijski mehanizam bombe i shvatili da nema nade da biste je mogli demontirati, a osim toga, vidjeli ste da je bomba postavljena na inovativan mehanizam. Montirana je na vagi. Ako očitanje na vagi odstupi od sadašnje

vrijednosti za više od 50%, bomba će detonirati. Prema satu na paklenom stroju, vidite da imate tjedan dana prije nego što bomba detonira u svakom slučaju. Na vašim ramenima počiva sudbina čovječanstva – što da radite?

Pa, shvatili ste da se od eksplozije ne biste mogli skloniti nikamo na svijetu i čini se da imate samo jednu mogućnost: morate lansirati uređaj u dubine svemira, gdje njegova eksplozija nikome neće naštetiti. Tu zamisao iznesete na sastanku svoje ekipe u FBI-u, ali neki mladi asistent odmah joj nađe prigovor. "Vaš plan ima ozbiljan problem", počinje vaš asistent Isaac. "Kako se uređaj bude udaljavao od Zemlje, težina će mu se smanjivati jer će se smanjivati gravitacijsko privlačenje između njega i Zemlje. To znači da će se smanjivati i očitavanje na vagi pa će detonacija nastupiti mnogo prije nego što bomba dospije u sigurnost dubokog svemira." Prije nego što ste stigli dobro razmisliti o toj kritici, uskače drugi mladi asistent: "Zapravo, kad malo promislimo, po-

stoji još jedan problem", kaže vaš asistent Albert. "Taj problem važan je kao i Isaacova primjedba, ali malo je istančaniji, pa imajte malo strpljenja dok ga budem objašnjavao." Želeći dobiti malo vremena da promislite o Isaacovom prigovoru, pokušavate ušutkati Alberta, ali kao i obično, kad počne, nitko ga ne može zaustaviti.

"Da bismo lansirali uređaj u svemir, moramo ga montirati na raketu. Kako raketa bude ubrzavala prema gore da bi prodrla u svemir, očitanje na vagi će se *povećati*, pa će uređaj i tako detonirati prerano. Vidite, osnova bombe – koja počiva na vagi – jače će pritiskati vagu nego kad uređaj miruje, isto kao kad ste leđima prikovani za sjedalo dok automobil ubrzava. Bomba će pritisnuti vagu isto kao što vaša leđa pritišću spužvu u sjedalu. Naravno, kad se vaga pritisne, očitanje joj se poveća – a to će prouzročiti detonaciju bombe ako povećanje bude veće od 50%."

Zahvaljujete Albertu na komentaru ali, protumačivši njegovo objašnjenje kao potvrdu Isaacovog prigovora, očajno

izjavljujete da je dovoljna jedna kobna mana da se zamisao odbaci, a Isaacova očito ispravna opservacija bila je dovoljna u tom smislu. Ispunjeni beznađem, tražite nove prijedloge. U tom trenutku Albert objavljuje zapanjujuće otkriće: "No ako dalje analiziramo situaciju", nastavlja on, "mislim da vaša ideja uopće nije neostvariva. Isaacova primjedba da se gravitacija smanjuje kako se uređaj diže u svemir znači da će se očitanje na vagi *smanjivati*. Moja primjedba da će ubrzanje prema gore prouzročiti da uređaj jače pritišće na vagu znači da će očitanje *rasti*. Kad se to zbroji, znači da, ako budemo pomno usklađivali ubrzanje rakete iz trenutka u trenutak, ta dva učinka će se *uzajamno poništiti*! Konkretno, u ranim fazama uzlijetanja, dok raketa još bude osjećala punu snagu Zemljine gravitacije, ona može ubrzavati, ali ne prejako, tako da ostane u granicama od 50%. Kako se raketa bude udaljavala od Zemlje – i stoga sve manje osjećala njezinu gravitaciju – morat ćemo pojačavati ubrzanje kako

bismo to kompenzirali. Porast očitanja na vagi prouzročen ubrzanjem može se izjednačivati sa smanjivanjem očitanja zbog slabljenja gravitacijskog privlačenja, pa tako možemo spriječiti da se očitanje na skali uopće mijenja! "

Albertov prijedlog polako počinje imati smisla. "Drugim riječima", odgovarate vi, "ubrzanje može biti zamjena za gravitaciju. Učinak gravitacije možemo oponašati odgovarajuće ubrzanim gibanjem."

"Upravo tako", potvrđuje Albert.

"Dakle," nastavljate vi, "*možemo* lansirati bombu u svemir i opreznim podešavanjem ubrzanja rakete osigurati da se vrijednost na vagi ne mijenja te tako izbjeći detonaciju sve dok se bomba dovoljno ne udalji od Zemlje." I tako ste, poigravajući se s gravitacijom i ubrzanim gibanjem – služeći se preciznom astronavigacijom dvadeset prvog stoljeća – uspjeli izbjeći katastrofu.

Spoznaja da su gravitacija i ubrzano gibanje duboko isprepleteni presudan je uvid do kojeg je Einstein došao jednoga

sretnoga dana u bernskom patentnom uredu. Iako događaj s bombom ističe bit te ideje, treba je izraziti i u kontekstu izloženom u poglavlju 2. U tu svrhu prisjetimo se da, ako se nalazite u hermetički zatvorenom odjeljku bez prozora koji *ne* ubrzava, nikako ne možete odrediti svoju brzinu. Odjeljak izgleda jednako i svaki eksperiment koji izvedete daje jednake rezultate, bez obzira na to koliko brzo se gibate. Na fundamentalnoj razini, bez vanjskih referenci za usporedbu, svom stanju gibanja nikako ne možete pripisati brzinu. S druge strane, ako ubrzavate, onda čak i kad vam je percepcija ograničena na zatvoren odjeljak, *osjetit* ćete silu na svom tijelu. Na primjer, ako je vaše sjedalo pričvršćeno na pod i gleda prema naprijed, osjetit ćete silu na svojim leđima kao da ste u automobilu koji opisuje Albert. Slično tome, ako vaš odjeljak ubrzava prema gore, osjetit ćete silu kojom vam pod djeluje na stopala. Einstein je shvatio da unutar granica svog malenog odjeljka nećete moći razlikovati ta ubrzanja

od situacija *bez ubrzanja* ali *s gravitacijom*: kad im pomno podesimo veličinu, sila koju osjećate u gravitacijskom polju ne može se razlikovati od ubrzanoga gibanja. Ako vaš vagon mirno stoji na površini Zemlje, osjećat ćete poznatu vam silu na tabanima, kao i u scenariju s ubrzanjem usmjerenim prema gore; to je ista ona ekvivalentnost koju je Albert iskoristio u svojem rješenju za lansiranje terorističke bombe u svemir. Kad bi vaš vagon bio postavljen vertikalno, osjećali biste silu na leđima (koja bi vas sprečavala da ne padnete), upravo kao kad ubrzavate horizontalno. Einstein je tu nerazlikovnost između ubrzanoga gibanja i gravitacije nazvao *načelom ekvivalencije*. Ono igra glavnu ulogu u općoj teoriji relativnosti.[2]

Taj opis pokazuje da opća teorija relativnosti dovršava posao koji je počela specijalna. Svojim načelom relativnosti, specijalna teorija relativnosti objavljuje demokraciju točaka gledišta: zakoni fizike isti su za sve promatrače u gibanju konstantnom brzinom. No to je zapravo ograničena demo-

kracija jer isključuje ogroman broj drugih gledišta – gledišta promatrača koji ubrzavaju. Einsteinov uvid iz 1907. sada

---

[2] Govoreći malo preciznije, Einstein je shvatio da načelo ekvivalencije vrijedi sve dok su naša promatranja ograničena na dovoljno maleno područje prostora – naime, sve dok nam je "odjeljak" dovoljno malen. Razlog tome je sljedeći. Gravitacijska polja mogu imati raznoliki iznos (i smjer) od mjesta do mjesta. No, zamišljamo da cijeli naš odjeljak ubrzava kao jedna jedinica i stoga naša akceleracija simulira jedno, jednoliko gravitacijsko polje. No, kako vam se odjeljak smanjuje, sve je manje prostora u kojemu gravitacijsko polje može varirati, i stoga načelo ekvivalencije postaje sve primjenjivije. Stručno govoreći, razlika između jednolikog gravitacijskog polja simuliranog ubrzavanim ishodištem i moguće nejednolikog "pravog" gravitacijskog polja koje stvara neka nakupina masivnih tijela poznata je kao "plimno" gravitacijsko polje (jer objašnjava Mjesečev gravitacijski učinak na plime na Zemlji). Dakle, ovu se bilješku može sažeti tako da kažemo da plimna gravitacijska polja postaju manje uočljiva kako se veličina našeg odjeljka smanjuje, pa ubrzano gibanje postaje nerazlučivo od "pravog" gravitacijskog polja.

nam pokazuje kako obuhvatiti *sve* točke gledišta – i ona u jednolikom gibanju i ona koja ubrzavaju – jednim egalitarnim okvirom. Budući da ne postoji razlika između ubrzavanoga gledišta *bez* gravitacijskog polja i neubrzavanoga gledišta *u* gravitacijskom polju, možemo se pozvati na potonju perspektivu i objaviti da *svi promatrači, bez obzira na stanje svoga gibanja, mogu izjaviti da su nepomični i da se "ostali svijet giba pokraj njih", sve dok u opis svoje okoline uključe i prikladno gravitacijsko polje*. U tom smislu, uključivanjem gravitacije, opća teorija relativnosti osigurava da sva moguća gledišta budu jednakovrijedna. (Kao što ćemo vidjeti niže, to znači da distinkcije između promatrača u poglavlju 2 koje su se oslanjale na ubrzano gibanje – kad je George pojurio za Gracie uključivši raketnu naprtnjaču i pritom ostario manje od nje – priznaju isto takav opis bez ubrzanja, ali s gravitacijom.)

Ta duboka povezanost između gravitacije i ubrzanoga gibanja zasigurno je važna spoznaja, ali zašto je tako usrećila

Einsteina? Jednostavno rečeno, razlog je u tome što je gravitacija tajanstvena. Ona je veličanstvena sila koja prožima život svemira, ali eterična je i izmiče nam. S druge strane, ubrzano gibanje, premda je malo zamršenije od gibanja stalnom brzinom, konkretno je i opipljivo. Pronašavši fundamentalnu vezu među njima, Einstein je shvatio da svoje razumijevanje gibanja može upotrijebiti kao moćno sredstvo za stjecanje sličnoga razumijevanja gravitacije. Ostvariti tu strategiju nije bilo jednostavno, čak ni za Einsteinov genij, ali taj pristup na kraju je urodio plodom – općom teorijom relativnosti. Da bi to postigao, Einstein je morao iskovati i drugu vezu u lancu koji ujedinjuje gravitaciju i ubrzano gibanje: zakrivljenost prostora i vremena, koju ćemo sada razmotriti.

Einstein je radio na problemu razumijevanja gravitacije krajnje intenzivno, gotovo opsesivno. Otprilike pet godina nakon svoga radosnog otkrića u bernskom patentnom uredu napisao je fizičaru Arnoldu Sommerfeldu: "Sada radim isključivo na problemu gravitacije... [J]edno je sigurno – da se nikada u životu nisam toliko mučio... U usporedbi s tim problemom, prva [tj. specijalna] teorija relativnosti je dječja igra."[3]

Čini se da je 1912. ostvario sljedeći važan proboj: shvatio je jednostavnu ali istančanu posljedicu primjene specijalne teorije relativnosti na vezu između gravitacije i ubrzanoga gibanja. Da bismo razumjeli taj korak u Einsteinovu razmišljanju najlakše je usredotočiti se, kao što je i on učinio, na osobit primjer ubrzanoga gibanja.[4] Prisjetimo se da predmet ubrzava ako se mijenja ili brzina ili smjer njegova gibanja. Radi jednostavnosti, razmotrit ćemo ubrzano gibanje u kojemu se mijenja samo *smjer* gibanja našeg predmeta, a brzi-

na mu ostaje ista. Konkretno, proučit ćemo gibanje u krugu poput onoga kakvo doživljavamo na vrtuljku zida smrti u lunaparku. U slučaju da nikada niste stavili na kušnju stabilnost svoje konstitucije na tom stroju, reći ćemo da stojite leđima naslonjeni na unutrašnju stranu kružne strukture od pleksiglasa koja se vrti velikom brzinom. Poput svakog ubrzanog gibanja, to gibanje osjećate – osjećate kako vam je tijelo vučeno radijalno od središta vrtuljka i osjećate da vam kružni zid od pleksiglasa pritišće na leđa i održava vas u kružnom gibanju. (Zapravo, iako to nije relevantno za našu raspravu, kružno gibanje "pribija" vam tijelo na pleksiglas takvom silom da, ako padne postolje na kojemu stojite, nećete

---

[3] Albert Einstein, citiran u: Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (New York: Viking, 1997), str. 315.

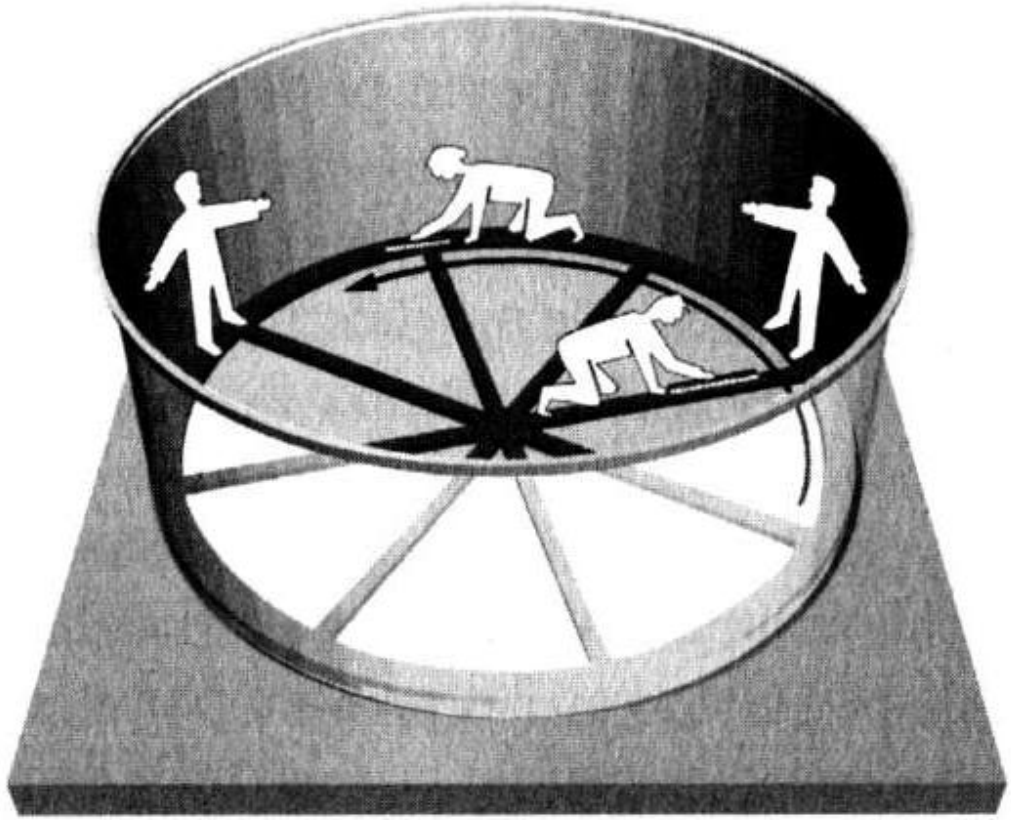
[4] John Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotating Disk", u: *General Relativity and Gravitation*, ur. A. Held (New York: Plenum, 1980), str. 1.

skliznuti prema dolje.) Ako je vožnja neometana i zatvorite oči, pritisak na vaša leđa – poput pritiska kreveta – gotovo vas može navesti da se osjećate kao da ležite. Ono "gotovo" proistječe iz činjenice da još osjećate i običnu, "vertikalnu" gravitaciju pa vaš mozak nije moguće prevariti u potpunosti. Ali kad biste se vozili na tom vrtuljku u svemiru, i kad bi se vrtio odgovarajućom brzinom, osjećali biste se upravo kao da ležite u nepokretnom krevetu na Zemlji. Štoviše, kad biste "ustali" i hodali unutrašnjošću vrtećeg pleksiglasa, vaša stopala pritiskala bi ga isto kao što pritišću pod na Zemlji. Zapravo, svemirske stanice projektirane su tako da na taj način stvaraju umjetan osjećaj gravitacije u svemiru.

Poslužívši se ubrzanim gibanjem vrtuljka kako bismo oponašali gravitaciju, sad možemo slijediti Einsteina i pogledati kako se prostor i vrijeme čine onome tko se vozi na vrtuljku. Njegova logika, primijenjena na tu situaciju, išla je kako slijedi. Mi, promatrači u mirovanju, lako možemo izmjeriti opseg i polumjer vrtuljka u vrtnji. Na primjer, da

izmjerimo opseg, možemo pažljivo položiti ravnalo – zbrajajući njegove duljine – uzduž ruba vrtuljka; za polumjer možemo postupiti slično i tom metodom zbrajanja izmjeriti udaljenost od središnje osi do vanjskog ruba. Kao što znamo iz osnovnoškolske geometrije, njihov omjer je jedan prema dva puta pi – oko 6,28 – kao i za svaki krug nacrtan na ravnom komadu papira. No kako stvari izgledaju iz perspektive nekoga tko je na vrtuljku?

Da bismo to doznali, zamolimo Slima i Jima, koji trenutačno uživaju u vožnji na vrtuljku, da za nas obave neka mjerenja. Jedno od ravnala damo Slimu, koji krene mjeriti opseg kruga, a drugo Jimu, koji krene mjeriti polumjer. Najbolju perspektivu dobit ćemo iz zraka, kao na slici 3.1. Tu snimku vrtuljka ukrasili smo strelicom koja u svakoj točki pokazuje trenutačnu usmjerenost gibanja. Kad Slim počne mjeriti opseg, iz svoje ptičje perspektive mi odmah vidimo da će dobiti drukčiji odgovor od nas. Kako on polaže ravna-



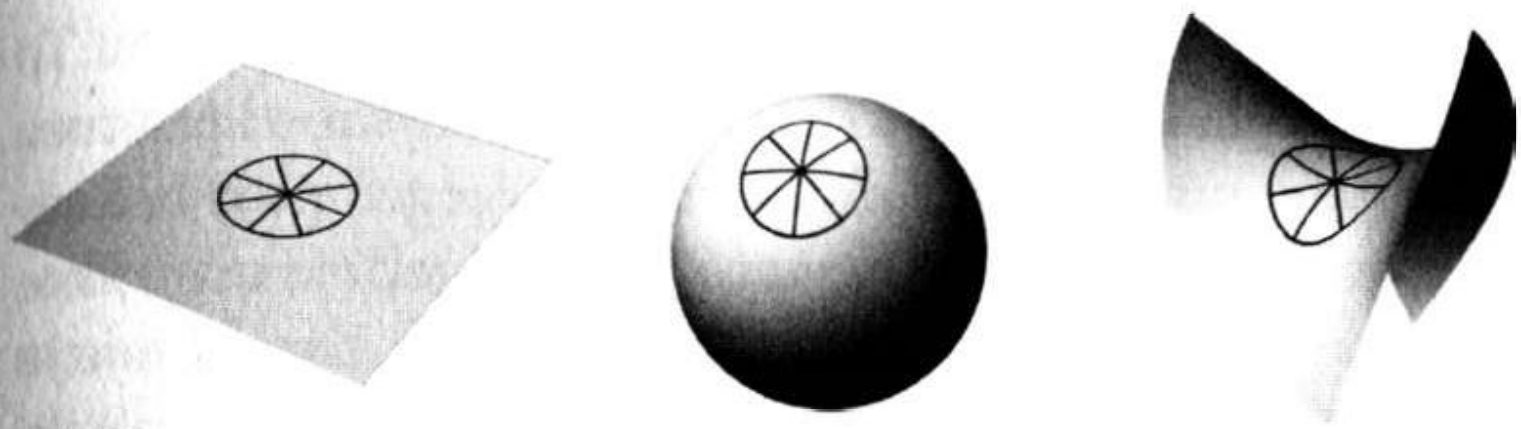
Slika 3.1. Slimovo ravnalo se skraćuje jer leži uzduž smjera gibanja vožnje. Ali Jimovo ravnalo leži uzduž radijalne šipke, okomite na smjer gibanja vožnje, te mu se stoga duljina ne smanjuje.

lo uzduž opsega, uočavamo da se *duljina ravnala smanjila*. To je upravo Lorentzova kontrakcija o kojoj smo raspravljali u poglavlju 2, u kojem se duljina predmeta smanjuje uzduž

smjera njegova gibanja. Kraće ravnalo znači da će ga morati položiti više puta kako bi obuhvatio cijeli opseg. Budući da on još smatra da je ravnalo dugačko jednu stopu (kako nema relativnoga gibanja između Slima i njegova ravnala, on ga vidi kao da ima uobičajenu duljinu od 30 cm), to znači da će Slim izmjeriti *dulji* opseg nego što smo mi. (Ako vam se to čini paradoksalnim, možda će vam pomoći bilješka 5.)

A što je s polumjerom? Pa, Jim se služi metodom zbrajanja da odredi duljinu radijalne šipke, a mi iz ptičje perspektive vidimo da će doći do istog rješenja kao i mi. Razlog je u tome što ravnalo ne pokazuje uzduž trenutačnog smjera gibanja vožnje (kao što pokazuje pri mjerenju opsega). Umjesto toga, pokazuje pod kutom od devedeset stupnjeva u odnosu na smjer gibanja, te se stoga *ne* skraćuje uzduž svoje duljine. Zato će Jim pronaći upravo jednaku radijalnu duljinu kao što smo i mi.

Ali sada, kad Slim i Jim izračunaju omjer opsega vožnje i njezina polumjera, dobit će broj koji je veći od našega rje-



Slika 3.2. Krug nacrtan na sferi (b) ima manji opseg od onoga koji je nacrtan na ravnom komadu papira (a), dok krug nacrtan na površini sedla (c) ima veći opseg, iako svi imaju isti polumjer.

šenja koje iznosi dva puta pi, jer je opseg veći, a polumjer je ostao isti. To je čudno. Kako je moguće da nešto što je u obliku kruga prekrši prastari grčki zakon da je za svaki krug taj omjer *točno* dva puta pi?

Evo Einsteinovog objašnjenja. Rezultat starih Grka vrijedi za krugove nacrtane na ravnoj površini. No isto kao što uvijeno ili iskrivljeno zrcalo u zabavnom parku izobličuje normalne prostorne odnose u vašem odrazu – ako se krug nacrta na uvijenoj ili iskrivljenoj površini, njegovi uobičajeni prostorni

odnosi također će biti izobličeni: omjer njegova polumjera i opsega uglavnom *neće* biti jedan prema dva puta pi.

Na primjer, na slici 3.2 uspoređena su tri kruga čiji su polumjeri jednaki. No, uočimo da im opsezi *nisu* jednaki. Opseg kruga (b), nacrtanog na zakrivljenoj površini kugle, manji je od opsega kruga nacrtanog na površini (a), iako imaju jednak polumjer. Zbog zakrivljene prirode površine kugle, radijalne linije kruga blago konvergiraju jedna prema drugoj, što rezultira malim smanjenjem opsega kruga. Opseg kruga (c), također nacrtanog na zakrivljenoj površini – u obliku sedla – veći je od onog nacrtanog na ravnoj površini; zbog zakrivljene prirode površine sedla radijalne linije kruga blago se odvajaju jedna od druge, što rezultira malim povećanjem opsega kruga. Te opservacije znače da će omjer opsega i polumjera kruga (b) biti manji od dva puta pi, dok će isti omjer na (c) biti veći od dva puta pi. No to odstupanje od dva puta pi, posebno veća vrijednost koju

nalazimo na (c) upravo je ono što smo našli na vrtuljku. To je navelo Einsteina da predloži ideju zakrivljenosti prostora kao objašnjenje kršenja "obične", euklidske geometrije. Ravna geometrija Grka, koja se već tisućama godina uči u školi, jednostavno ne vrijedi ako ste na vrtuljku. Zamjenjuje ju njezina generalizacija u zakrivljenom prostoru, shematski prikazana na dijelu (c) slike 3.2.[5]

---

[5] Analiza vožnje na vrtuljku, ili "kruto rotirajućeg diska", kako se to stručno naziva, lako može dovesti i do zbrke. Zapravo, do danas nije došlo do općeg slaganja o mnogim zakučastim aspektima tog primjera. U tekstu smo slijedili duh Einsteinove vlastite analize, a u ovoj bilješci nastavljamo s toga gledišta i želimo objasniti dva pitanja koja su vas možda zbunila. Prvo, možda vas zanima zašto opseg vrtuljka nije podložan Lorentzovoj kontrakciji kao i ravnalo, te je Slim izmjerio da ima duljinu jednaku onoj koju smo prvotno izmjerili. No imajmo na umu da se u cijeloj našoj raspravi vrtuljak neprekidno vrtio; *nismo* analizirali vrtuljak kad je mirovao. Dakle, iz perspektive stacionarnih promatrača, jedina razlika između na-

šeg i Slimovog mjerenja opsega vrtuljka u tome je što je Slimovo ravnalo podložno Lorentzovoj kontrakciji; vrtuljak se vrtio dok smo mjerili, i dok smo gledali kako Slim obavlja svoje mjerenje. Budući da vidimo da se njegovo ravnalo skratilo, shvaćamo da će ga morati položiti više puta kako bi prošao cijeli opseg te tako izmjerio veću duljinu nego mi. Lorentzova kontrakcija opsega vrtuljka bila bi relevantna samo da smo usporedili svojstva vrtuljka u vrtnji i u mirovanju, ali ta usporedba nije nam potrebna.

Drugo, bez obzira na činjenicu da nismo morali analizirati vrtuljak u mirovanju, možda se i dalje pitate što *bi* se dogodilo kad bi usporio i zaustavio se. Možda se čini da moramo uzeti u obzir promjenu opsega s promjenom brzine, zbog različitih stupnjeva Lorentzove kontrakcije. No kako se to može pomiriti s nepromjenjivim polumjerom? To je zakučast problem, čije se rješenje oslanja na činjenicu da u svijetu ne postoje *potpuno kruti* predmeti. Predmeti se mogu rastezati i iskrivljavati te tako objasniti rastezanje ili stezanje na koje smo naišli; kada to ne bi bilo tako, kao što je istaknuo Einstein, rotirajući disk koji je na početku nastao tako što se vrteća masa otopljena metala ohladila raspao bi se kad bi se tempo njezine vrtnje znatno promijenio. Više o povijesti kruto rotirajućeg diska vidi u: Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotating Disk".

I tako je Einstein shvatio da poznati nam geometrijski prostorni odnosi koje su zapisali još Grci, odnosi koji vrijede za likove "ravnoga" prostora kao što je krug na ravnom stolu, *ne vrijede* iz perspektive ubrzanoga promatrača. Naravno, raspravili smo samo jednu vrstu ubrzanoga gibanja, ali Einstein je pokazao da sličan rezultat – uvijanje prostora – vrijedi za sve primjere ubrzanoga gibanja.

Zapravo, ubrzano gibanje ne uzrokuje samo uvijanje prostora nego i analogno uvijanje vremena. (Povijesno gledano, Einstein se prvo usmjerio na uvijanje vremena, a potom je shvatio važnost uvijanja prostora.[6]) Na jednoj razini, ne bi nas trebalo iznenaditi da uvijanje zahvaća i vrijeme, jer smo u poglavlju 2 već vidjeli da specijalna teorija relativnosti izražava jedinstvo prostora i vremena. Tu fuziju poetski je sažeo Minkowski, kad je na predavanju o specijalnoj teoriji relativnosti 1908. rekao: "Odsad će se prostor sam po sebi i vrijeme samo po sebi pretvarati u puke sjene, a neovisnost će zadržati samo svojevrsno jedinstvo to dvoje."[7] Više ovo-

zemaljskim, ali jednako tako nepreciznim jezikom rečeno, specijalna teorija relativnosti objavljuje: "Što je istinito za prostor, istinito je i za vrijeme." Ali, time se postavlja pitanje: dok možemo prikazati uvijeni prostor tako da ima zakrivljeni oblik, što zapravo podrazumijevamo pod uvijenim vremenom?

Kako bismo dobili dojam o odgovoru, vratimo se Slimu i Jimu na vrtuljku i zamolimo ih da provedu sljedeći eksperiment. Slim će stajati leđima oslonjen na zid vrtuljka, na kraju jedne od radijalnih šipki, dok će Jim polako puzati prema njemu uzduž šipke, krenuvši od središta vrtuljka. Svakih ne-

---

6 Stručan čitatelj znat će da se u primjeru vožnje na vrtuljku, to jest u slučaju jednoliko rotirajućeg referentnog sustava, zakrivljeni trodimenzionalni odsječci prostora na koje smo se usredotočili uklapaju u četverodimenzionalno prostorvrijeme čija zakrivljenost ipak nestaje.

7 Herman Minkowski, citiran u: Fölsing, *Albert Einstein*, str. 189.

koliko trenutaka Jim će zastati i braća će usporediti očitanja na svojim satovima. Što će otkriti? Iz svoje nepomične ptičje perspektive ponovno možemo predvidjeti odgovor. Satovi im se neće poklapati. Do tog zaključka dolazimo jer shvaćamo da Slim i Jim putuju različitim brzinama – na vrtuljku, što ste dalje niz radijalnu šipku, to više morate prevaliti da biste dovršili jedan okret, pa stoga morate ići brže. Ali prema specijalnoj teoriji relativnosti, što brže putujete, sat vam otkucava tim sporije, pa stoga shvaćamo da će Slimov sat otkucavati sporije nego Jimov. Štoviše, Slim i Jim će vidjeti da, kako se Jim bude približavao Slimu, Jimov sat će otkucavati sve sporije i približavati se brzini otkucavanja Slimovog sata. To je odraz činjenice da, kako se Jim udaljava od središta vrtuljka, njegova kružna brzina se povećava i približava Slimovoj.

Zaključujemo da promatračima na vrtuljku, kao što su Slim i Jim, brzina protjecanja vremena ovisi o njihovu preciznom položaju – u ovom slučaju, o udaljenosti od sredi-

šta vrtnje. To je ilustracija onoga što podrazumijevamo pod uvijenim vremenom: vrijeme je uvijeno ako se brzina njegova protoka razlikuje od jedne do druge lokacije. A što je od posebne važnosti za našu raspravu, Jim će uočiti i nešto drugo dok bude puzao po šipki. Osjetit će sve jaču silu usmjerenu prema van jer se ne povećava samo brzina nego i ubrzanje kako se on udaljava od središta vrtnje. Dakle, na vrtuljku vidimo da je veće ubrzanje povezano sa sporijim satovima – to jest, veće ubrzanje rezultira značajnijim uvijanjem vremena.

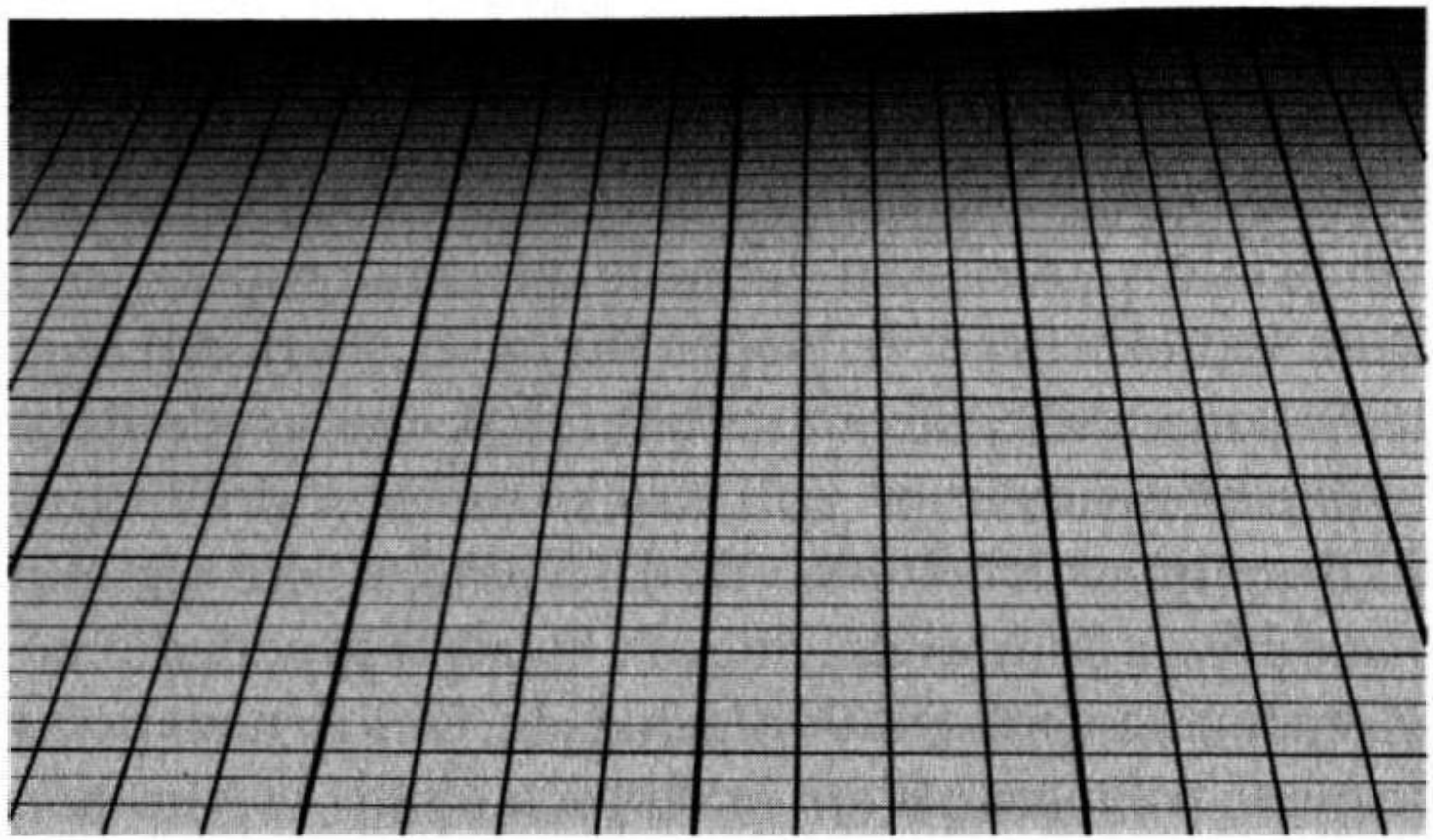
Te opservacije dovele su Einsteina do konačnoga koraka. Budući da je već dokazao da se gravitacija i ubrzano gibanje praktički ne razlikuju, i da je ubrzano gibanje povezao s uvijanjem prostora i vremena, iznio je sljedeći prijedlog za mehanizam "crne kutije" gravitacije – mehanizam kojim gravitacija djeluje. Prema Einsteinu, gravitacija je uvijanje prostora i vremena. Pogledajmo što to znači.

Da bismo dobili osjećaj o tom novom viđenju gravitacije, razmotrimo prototipsku situaciju planeta, poput Zemlje, koji se vrti oko zvijezde, poput Sunca. U Newtonovoj gravitaciji Sunce drži Zemlju u orbiti nekakvom neodređenom gravitacijskom "uzicom" koja nekako trenutno doseže preko velikih svemirskih udaljenosti i drži Zemlju (a Zemlja slično poseže prema Suncu i drži njega). Einstein je ponudio novu koncepciju onoga što se doista događa. Ona će nam pomoći u raspravi o Einsteinovom pristupu tako što će nam ponuditi konkretan vizualni model prostorvremena kojim ćemo moći prikladno baratati. Da bismo to učinili, pojednostavit ćemo stvari na dva načina. Prvo, zasad ćemo ignorirati vrijeme i usredotočiti se na vizualni model prostora. Vrijeme ćemo u našu raspravu uključiti uskoro. Drugo, kako bismo mogli crtati vizualne slike u ovoj knjizi i baratati njima, često ćemo se pozivati na *dvo*dimenzionalnu analogiju trodi-

menzionalnog prostora. Većinu spoznaja koje ćemo dobiti razmišljanjem u okvirima tog dvodimenzionalnog modela izravno je primjenjiva na fizički, trodimenzionalni svijet, pa je stoga jednostavniji model moćno pedagoško sredstvo.

Na slici 3.3 služimo se tim pojednostavljenjima i crtamo dvodimenzionalni model jednog područja prostora našeg univerzuma. Mrežasta struktura ističe prikladan način određivanja položaja isto kao što je mreža ulica sredstvo za određivanje lokacije u gradu. Naravno, u gradu dajemo adresu određujući lokaciju u dvodimenzionalnoj mreži ulica, a lokaciju navodimo i u vertikalnom smjeru, dajući broj kata. Posljednju informaciju, lokaciju u trećoj prostornoj dimenziji, naša dvodimenzionalna analogija izostavlja radi vizualne jasnoće.

Einstein je zamislio da bi u odsutnosti svake materije i energije prostor bio *ravan*. U našem dvodimenzionalnom modelu to znači da bi "oblik" prostora bio poput površine

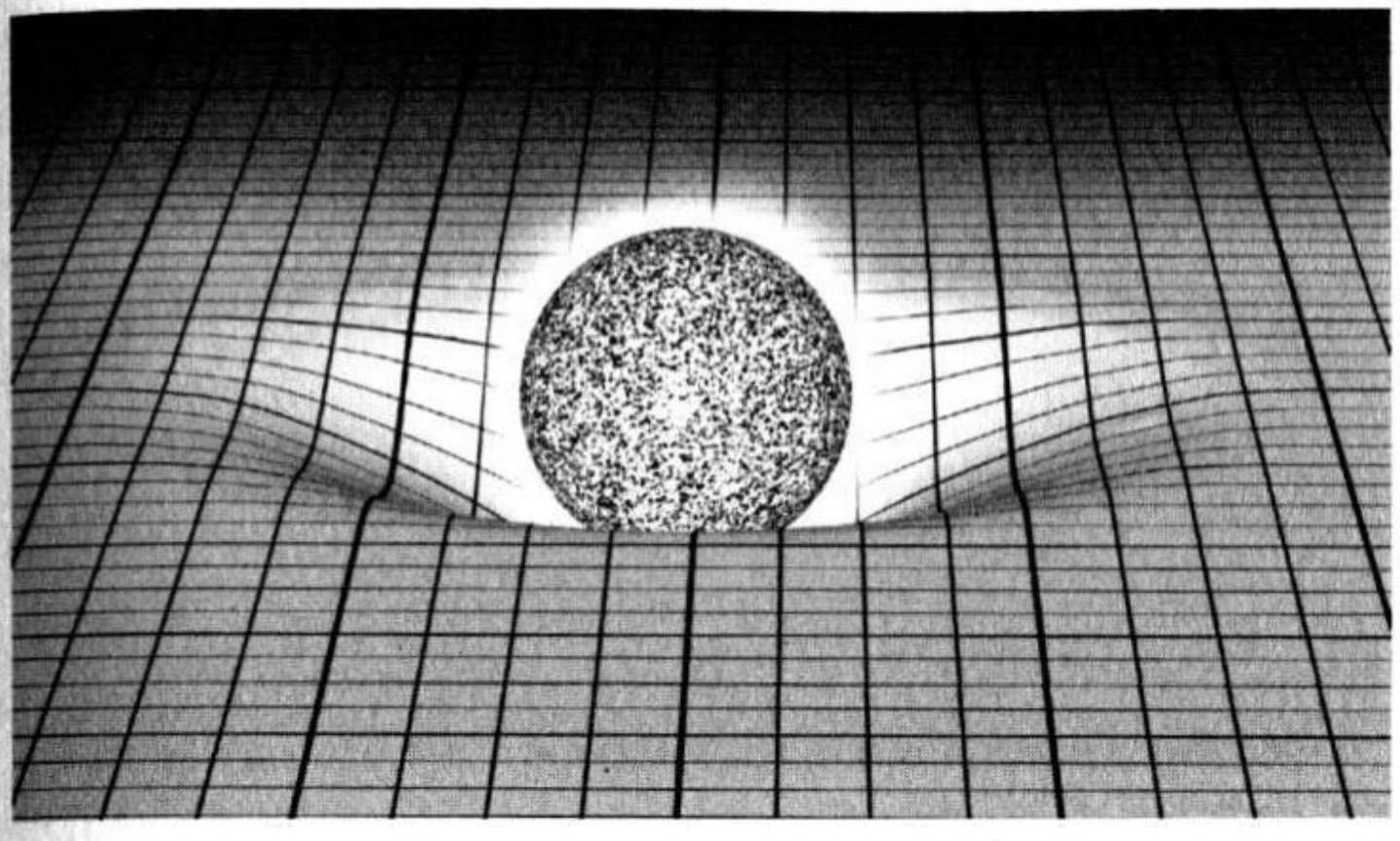


Slika 3.3 Shematski prikaz ravnog prostora.

ravna stola, kao što je nacrtano na slici 3.3. Takve slike svoga prostornog univerzuma držimo se već tisućama godina. Ali što se događa prostoru kad je prisutan masivan predmet, poput zvijezde? Prije Einsteina, odgovor je glasio *ništa*: smatralo se da su prostor (i vrijeme) nepomična pozornica koja

samo postavlja kulise za događaje u univerzumu. No, Einsteinova logika koju ovdje pratimo vodi do drukčijeg zaključka.

Masivno tijelo, poput Sunca, a zapravo i svakog drugog tijela, gravitacijskom silom djeluje na druge predmete. U primjeru s terorističkom bombom naučili smo da se gravitacijske sile ne može razlikovati od ubrzanog gibanja. U primjeru s vrtuljkom naučili smo pak da su za matematički opis ubrzanog gibanja *nužni* odnosi uvijenog prostora. Te veze između gravitacije, ubrzanog gibanja i zakrivljenog prostora navele su Einsteina na važnu sugestiju da prisutnost mase, poput Sunca, uzrokuje da se tkivo prostora *uvije*, kao što je prikazano na slici 3.4. Korisna i često navođena analogija glasi da, poput gumene opne na kojoj počiva kugla za kuglanje, tkivo prostora postaje iskrivljeno zbog prisutnosti masivnog tijela, poput Sunca. Prema toj radikalnoj sugestiji, prostor nije samo pasivan forum koji nudi arenu za događaje u univerzumu; umjesto toga, oblik prostora reagira na tijela u okolini.

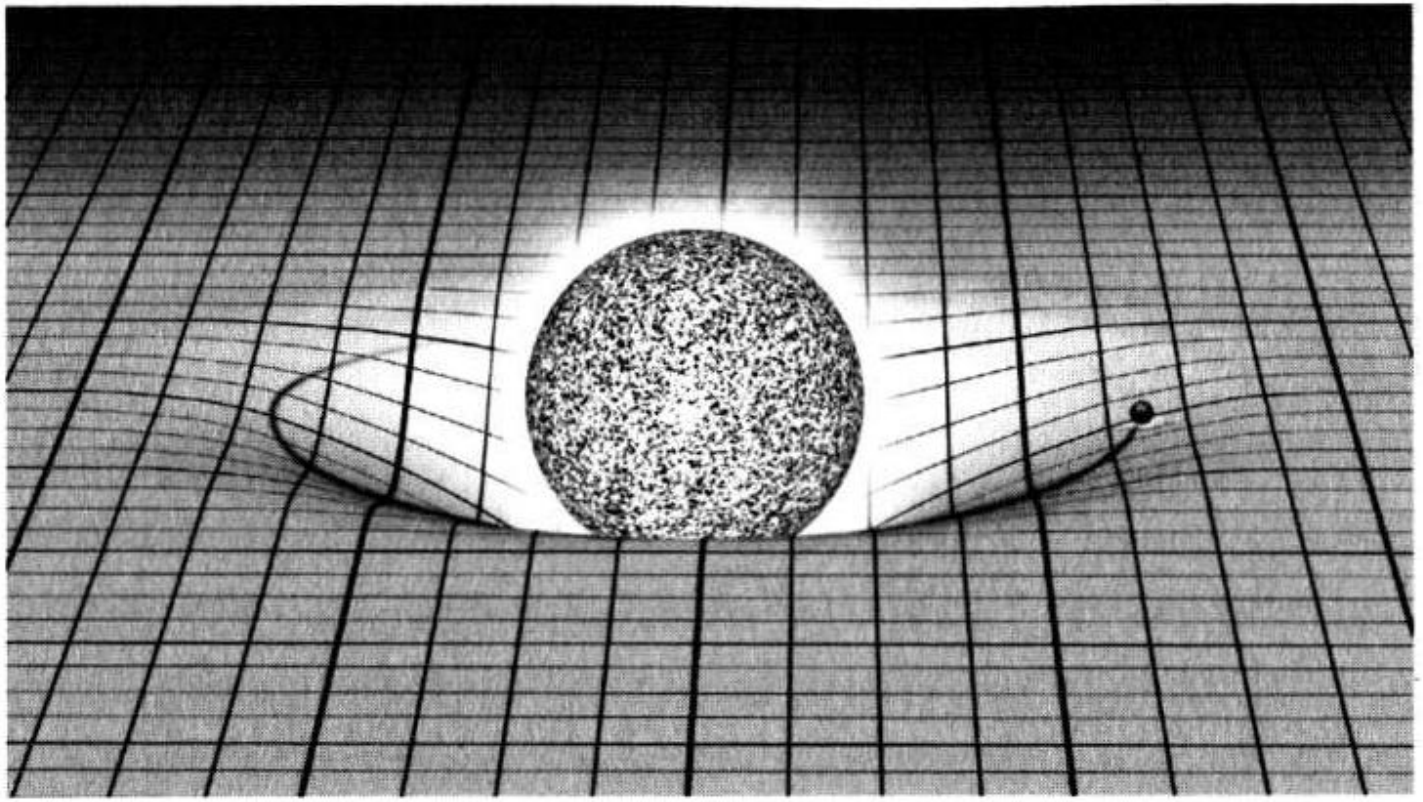


Slika 3.4 Tijelo masivno poput Sunca uzrokuje da se tkivo prostora uvije, donekle nalik učinku kugle na gumenoj opni.

To uvijanje pak utječe na druga tijela koja se gibaju u blizini Sunca jer ona sad moraju prolaziti kroz iskrivljeno tkivo prostora. Poslužimo li se analogijom s gumenom opnom i kuglom za kuglanje, ako na opnu postavimo kuglicu iz kugličnog ležaja i damo joj određenu početnu brzinu, putanja

glicnog ležaja i dano joj određenu početnu brzinu, putanja kojom će ona krenuti ovisi o tome je li kugla za kuglanje u sredini opne. Ako je nema, opna će biti ravna i kuglica će putovati ravnom linijom. Ako je kugla tu i samim time uvija opnu. kuglica će putovati zakrivljenom putanjom. Zapravo, zanemarimo li trenje, ako pokrenemo kuglicu upravo odgovarajućom brzinom upravo u odgovarajućem smjeru, ona će se nastaviti gibati trajnom kružnom putanjom oko kugle – "ući će u orbitu". Naš jezik sam po sebi upućuje na primjenu te analogije na gravitaciju.

Poput kugle za kuglanje, Sunce uvija tkivo prostora koji ga okružuje, a gibanje Zemlje, poput gibanja kuglice, određeno je oblikom tog uvoja. Zemlja će se, poput kuglice, gibati u orbiti oko Sunca ako njezina brzina i smjer imaju odgovarajuće vrijednosti. Taj učinak na gibanje Zemlje obično bismo nazvali gravitacijskim utjecajem Sunca; ilustriran je na slici 3.5. No razlika je u tome što je, za razliku od Newtona, Einstein odredio *mehanizam* kojim se gravitacija prenosi:



Slika 3.5 Zemlja se održava u orbiti oko Sunca jer se kotrlja po dolini u uvijenom tkivu prostora. Preciznije rečeno, ona slijedi "putanju najmanjeg otpora" u iskrivljenom prostoru oko Sunca.

uvijanje prostora. Prema Einsteinovom gledištu, gravitacijska uzica koja drži Zemlju u orbiti nije nikakvo tajanstveno djelovanje Sunca, ona je uvijanje tkiva prostora, prouzročeno prisutnošću Sunca.

Ta slika omogućuje nam da na nov način razumijemo dva osnovna svojstva gravitacije. Prvo, što je kugla masivnija, to veće iskrivljenje stvara u gumenoj opni; slično tome, u Einsteinovom opisu gravitacije, što je tijelo masivnije, to veće iskrivljenje stvara u prostoru koji ga okružuje. To znači da, što je tijelo masivnije, to veći gravitacijski utjecaj ima na druga tijela, što je u savršenom skladu s našim iskustvom. Drugo, kao što iskrivljenje gumene opne zbog prisutnosti kugle postaje manje kako se udaljavamo od nje, količina uvijanja prostora zbog tijela masivnog poput Sunca opada kako se udaljavamo od njega. I to se poklapa s našim razumijevanjem gravitacije, čiji utjecaj slabi kako se udaljenost između tijela povećava.

Važno je napomenuti da i sama kuglica uvija gumenu opnu, premda tek neznatno. Slično tome, Zemlja kao masivno tijelo samo po sebi, također uvija tkivo prostora, premda mnogo manje nego Sunce. Tako u općoj teoriji relativnosti Zemlja drži Mjesec u orbiti, a i nas prikovane za tlo. Dok

se padobranac obrušava prema tlu, on klizi niz ulegnuće u tkivu prostora koje stvara Zemljina masa. Štoviše, svi mi – poput svih tijela koja imaju masu – također uvijamo tkivo prostora u blizini svoga tijela, premda je to neznatan urez, zbog komparativno malene mase ljudskog tijela.

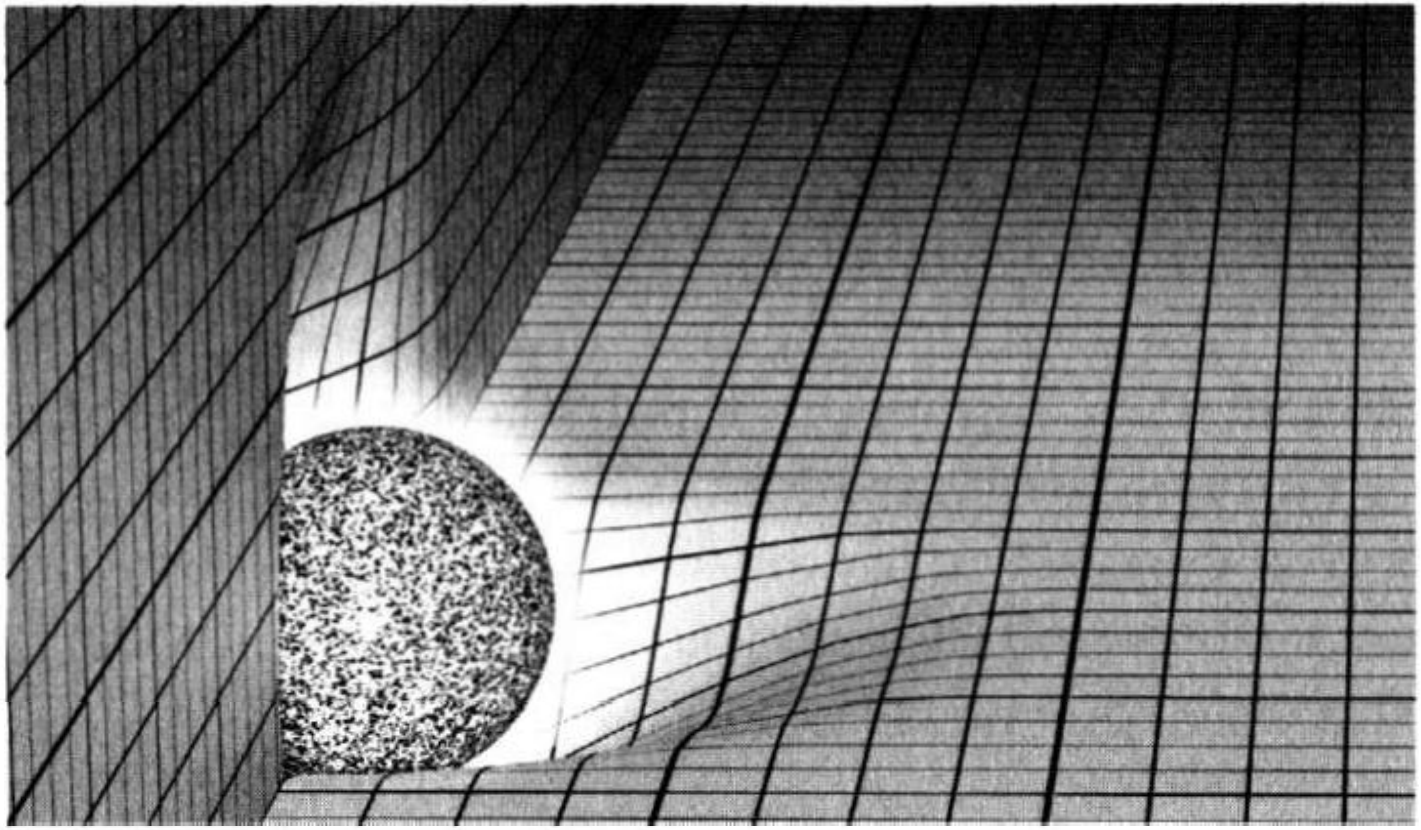
U zaključku, Einstein se u potpunosti slaže s Newtonovom tvrdnjom da "gravitaciju mora uzrokovati neki agens" i prihvatio je Newtonov izazov u kojemu je identitet tog agensa ostavljen "mišljenju [njegovih] čitatelja". Prema Einsteinu, agens gravitacije je tkivo svemira.

Nekoliko upozorenja

Analogija s gumenom opnom i kuglom za kuglanje vrijedna je jer nam pruža vizualnu sliku kojom možemo konkretno vidjeti što podrazumijevamo pod uvijanjem prostornog tkiva univerzuma. Fizičari se često služe tom i sličnim analo-

gijama kako bi im vodile intuiciju o gravitaciji i zakrivljenosti. Međutim, bez obzira na svoju korisnost, analogija s gumenom opnom i kuglom nije savršena i radi jasnoće ćemo skrenuti pozornost na neke njene nedostatke.

Prvo, kad Sunce uvije tkivo prostora oko sebe, to nije zato što ga gravitacija "vuče prema dolje" kao u slučaju kugle za kuglanje, koja uvija gumenu membranu zato što je gravitacija vuče prema tlu. U slučaju Sunca, nema drugog tijela koje bi "vuklo" umjesto njega. Einstein nas je poučio da uvijanje prostora *jest* gravitacija. Već sama prisutnost tijela koje ima masu navodi prostor da se uvije. Slično tome, Zemlja ne ostaje u orbiti zato što je gravitacijsko privlačenje nekog drugog vanjskog tijela vodi po dolinama u uvijenoj gumenoj opni. Umjesto toga, Einstein nam je pokazao da se tijela gibaju prostorom (preciznije rečeno, prostorvremenom) najkraćim mogućim putem – "najlakšim mogućim putem" ili "putanjom najmanjeg otpora". Ako je prostor uvijen, te



Slika 3.6 Uzorak uvijenog trodimenzionalnog prostora oko Sunca.

putanje bit će zakrivljene. I tako, premda model s gumenom opnom i kuglom pruža dobru vizualnu analogiju kako tijelo poput Sunca uvija prostor oko sebe i tako utječe na gibanje drugih tijela, fizikalni mehanizam kojim se ta iskrivljenja pojavljuju posve je drukčiji. Prvi se poziva na našu intuiciju

o gravitaciji u tradicionalnom Newtonovom okviru, a drugi izražava novu formulaciju gravitacije u smislu zakrivljenog prostora.

Drugi nedostatak analogije je dvodimenzionalnost gumene opne. U stvarnosti, premda je to teško vizualizirati, Sunce (i sva druga masivna tijela) zapravo uvija trodimenzionalni prostor oko sebe. Slika 3.6 je grub pokušaj da se to prikaže; *sav* prostor oko Sunca – "ispod", "sa strane", na "vrhu" – pati od iste vrste iskrivljenja, i slika 3.6 shematski prikazuje djelomičan uzorak toga. Tijelo, poput Zemlje, putuje *kroz* trodimenzionalni uvijeni prostor prouzročen Sunčevom prisutnošću. Možda smatrate da je ta slika problematična – zašto Zemlja ne udari u "vertikalni dio" zakrivljenog prostora na slici? No imajmo na umu da prostor, za razliku od gumene opne, nije čvrsta prepreka. Umjesto toga, uvijene mreže na slici samo su dva tanka prereza kroz puni, trodimenzionalni uvijeni prostor u koji ste uronjeni vi, Zemlja i sve drugo, i u njemu se slobodno gibate. Možda

vam se čini da to samo pogoršava problem: zašto ne *osjećamo* prostor ako smo uronjeni u njegovo tkivo? Ali, osjećamo ga. Osjećamo gravitaciju, a prostor je medij kojim se gravitacijska sila prenosi. Kao što često kaže ugledni fizičar John Wheeler kad opisuje gravitaciju: "masa grabi prostor kazujući mu kako da se uvije, a prostor grabi masu govoreći joj kako da se giba."[8]

Treći, srodan nedostatak analogije je to što smo potisnuli dimenziju vremena. To smo učinili zbog vizualne jasnoće jer, bez obzira na tvrdnju specijalne teorije relativnosti da bismo vremensku dimenziju trebali shvaćati kao ravnopravnu trima poznatim prostornim dimenzijama, vrijeme je znatno teže "vidjeti". Međutim, kao što je ilustrirano primjerom vrtuljka, ubrzanje – a time i gravitacija – uvija *i prostor i vrijeme*. (Zapravo, matematika opće teorije relativnosti pokazuje da u slučaju tijela koje se relativno sporo giba, poput Zemlje, oko tipične zvijezde poput Sunca, uvijanje vremena zapravo ima mnogo značajniji učinak na gibanje Zemlje nego na

uvijanje prostora.) Raspravi o uvijanju vremena vratit ćemo se nakon sljedećeg odjeljka.

Koliko god ova upozorenja bila važna, sve dok ih imate negdje u zakutku uma, posve je prihvatljivo služiti se slikom uvijenog prostora koju nudi kugla na gumenoj opni kao intuitivnim sažetkom Einsteinovog novog viđenja gravitacije.

Rješenje sukoba

Uvodeći prostor i vrijeme kao dinamične igrače, Einstein je ponudio jasnu pojmovnu sliku mehanizma gravitacije. No, glavno pitanje glasi rješava li ta preformulacija gravitacijske sile sukob sa specijalnom teorijom relativnosti koji pogađa Newtonovu teoriju gravitacije. Rješava. I tu nam analogija s gumenom opnom pruža osnovnu ideju. Zamislimo da ima-

---

[8] Intervju s Johnom Wheelerom, 27. siječnja 1998.

mo kuglicu koja se kotrlja ravnom linijom po ravnoj opni u odsutnosti kugle. Kad postavimo kuglu na opnu, gibanje kuglice će se promijeniti, ali *ne istog trenutka*. Kad bismo filmski snimili taj niz događaja i pogledali ga na usporenom filmu, vidjeli bismo da se poremećaj prouzročen postavljanjem kugle širi poput valića u jezercu i na kraju dolazi do položaja kuglice. Nakon kratkog vremena, prolazni titraji uzduž gumene opne smirit će se i ostaviti nam statičnu, uvijenu opnu.

Isto vrijedi i za tkivo prostora. Kad nema nikakve mase, prostor je ravan, i malen predmet će blaženo mirovati ili putovati stalnom brzinom. Ako na pozornicu stupi neka velika masa, prostor će se uviti – ali kao u slučaju opne, iskrivljenje neće nastupiti trenutno. Umjesto toga, širit će se prema van od masivnog tijela i na kraju se smiriti u uvijenom obliku koji prenosi gravitacijsko privlačenje novog tijela. U našoj analogiji, poremećaji gumene opne putuju njome brzinom koju određuje njezin materijalni sastav. U stvarnom kon-

tekstu opće teorije relativnosti Einstein je uspio izračunati koliko brzo putuju poremećaji u tkivu univerzuma i otkrio je da putuju *upravo brzinom svjetlosti*. To znači, na primjer, da u gore razmotrenom hipotetičnom primjeru u kojemu nestanak Sunca utječe na Zemlju preko promjena u njihovu uzajamnom gravitacijskom privlačenju, taj utjecaj neće se prenijeti istoga trenutka. Umjesto toga, kad tijelo promijeni položaj, ili se čak raspadne, ono prouzroči promjenu u iskrivljenju tkiva prostorvremena koja se širi brzinom svjetlosti, što je u savršenom skladu s kozmičkim ograničenjem brzine prema specijalnoj teoriji relativnosti. Tako bismo mi na Zemlji vizualno doznali o uništenju Sunca u istom trenutku u kojem bismo osjetili gravitacijske posljedice – oko osam minuta nakon eksplozije. Tako Einsteinova formula rješava sukob; gravitacijski poremećaji drže korak s fotonima, ali ih ne pretječu.

Ilustracije poput onih na slikama 3.2, 3.4 i 3.6 izražavaju bit onoga što "uvijeni prostor" znači. Uvoj iskrivljuje oblik prostora. Fizičari se domišljaju analoškim slikama kako bi pokušali izraziti značenje "uvijenog vremena", ali njih je znatno teže dešifrirati, pa ih ovdje nećemo prikazati. Umjesto toga, slijedimo primjer Slima i Jima na vrtuljku i pokušajmo steći dojam o iskustvu gravitacijski induciranog uvijenog vremena.

Da bismo to učinili, vratimo se Georgeu i Gracie, koji više nisu u tami dubokog, praznog svemira, nego lebde negdje u blizini Sunčevog sustava. Još nose velike digitalne satove na svojim skafanderima, koji su na početku bili usklađeni. Da bi stvari ostale jednostavne, zanemarit ćemo učinke planeta i razmatrati samo gravitacijsko polje Sunca. Nadalje, zamislimo da je svemirski brod koji lebdi pokraj Georgea i Gracie ispustio dugačak kabel koji se pruža go-

tovo sve do površine Sunca. George se tim kabelom polako spušta prema Suncu. Pritom povremeno zastaje kako bi on i Gracie usporedili tempo kojim vrijeme protječe na njihovim satovima. Uvijanje vremena koje predviđa Einsteinova opća teorija relativnosti implicira da će Georgeov sat otkucavati sve sporije u usporedbi s Gracienim kako gravitacijsko polje u kojemu se nalazi bude jačalo. Dakle, što se više bude približavao Suncu, sat će mu sporije otkucavati. U tom smislu gravitacija iskrivljuje i vrijeme kao i prostor.

Trebali bismo napomenuti da za razliku od slučaja u poglavlju 2, u kojemu su George i Gracie bili u praznom svemiru i gibali se jedno u odnosu na drugo stalnom brzinom, u ovom kontekstu među njima nema simetrije. George, za razliku od Gracie, *osjeća* kako gravitacijska sila jača – kako se približava Suncu, on se mora sve jače držati za kabel da ga Sunce ne bi privuklo. Oboje se slažu da Georgeov sat kasni. Ne postoji nikakva "jednako valjana perspektiva" koja

bi razmijenila njihove uloge i poništila taj zaključak. To smo zapravo otkrili u poglavlju 2 kad je George osjećao ubrzanje kad je uključio raketnu naprtnjaču kako bi dostigao Gracie. Ubrzanje koje je George osjećao uzrokovalo je da njegov sat definitivno otkucava sporije nego Gracien. Budući da sad znamo da je osjećaj ubrzanoga gibanja jednak osjećaju gravitacijske sile, sadašnja Georgeova situacija na kabelu uključuje isti princip, i ponovno vidimo da Georgeov sat kasni, kao što se i sve ostalo u njegovu životu, odvija kao na usporenom filmu u usporedbi s Gracie.

U gravitacijskom polju poput onoga na površini obične zvijezde kao što je Sunce, usporavanje sata prilično je maleno. Ako Gracie miruje milijardu i 600 milijuna kilometara od Sunca, onda kad se George spusti na nekoliko kilometara od njegove površine, tempo otkucavanja njegova sata bit će oko 99,9998% Graciena sata. Kasnit će, ali ne mnogo.[9] No kad bi se George kabelom spustio tako da lebdi tik iznad površine neke neutronske zvijezde čija je masa, otprilike

jednaka masi Sunca, zgusnuta do gustoće oko milijun milijardi puta veće od gustoće Sunca, njezino gravitacijsko polje usporilo bi njegov sat na oko 76% tempa Gracienog sata. Jača gravitacijska polja, poput onog tik izvan crne rupe (što

---

9 No ipak, postojeći atomski satovi dovoljno su precizni da detektiraju tako sićušna uvijanja vremena. Na primjer, 1976. su Robert Vessot i Martin Levine s Harvard-Smithsonian Astrophysical Observatory, zajedno sa suradnicima u National Aeronautics and Space Administration (NASA) lansirali raketu Scout D iz Wallops Island, Virginia, koja je nosila atomski sat tako precizan da griješi bilijuntinku sekunde na sat. Nadali su se da će pokazati da, kako se raketa uspinje (i tako smanjuje učinak gravitacijskog polja), identičan sat na Zemlji (koji je i dalje podložan punoj sili Zemljine gravitacije) otkucava polaganije. Posluživši se dvosmjernim mikrovalnim signalima, istraživači su uspjeli usporediti tempo otkucavanja tih dvaju atomskih satova i doista, kad je raketa dosegnula svoju maksimalnu visinu od 9600 kilometara, njezin atomski sat žurio je za 4 otkucaja na milijardu otkucaja svog pandana na Zemlji, što se slaže s teorijskim predviđanjima s preciznošću od stotinke postotka.

ćemo raspraviti niže) još više usporavaju protok vremena; jača gravitacijska polja uzrokuju jače uvijanje vremena.

Provjera opće relativnosti eksperimentima

Većina ljudi koji proučavaju opću teoriju relativnosti divi se njezinoj estetskoj eleganciji. Zamijenivši hladno, mehaničko Newtonovo viđenje prostora, vremena i gravitacije dinamičnim i geometrijskim opisom koji uključuje zakrivljeno prostorvrijeme, Einstein je utkao gravitaciju u temeljno tkivo univerzuma. Umjesto da bude nametnuta kao nekakva dodatna struktura, gravitacija postaje integralni dio univerzuma na njegovoj najosnovnijoj razini. Oživljavanje prostora i vremena tako da se oni mogu uvijati, iskrivljavati i nabirati se – upravo to je ono što obično nazivamo gravitacijom.

No bez obzira na estetiku, konačan test svake fizikalne teorije je njezina sposobnost da točno objašnjava i predvi-

đa fizikalne pojave. Od svoga začetka krajem sedamnaestog stoljeća pa sve do početka dvadesetog stoljeća Newtonova teorija gravitacije prolazila je taj test s odličnim uspjehom. Bilo da se primjenjuje na lopte bačene u zrak, predmete ispuštene s kosog tornja, komete koji se vrte oko Sunca ili planete u svojim orbitama, Newtonova teorija pruža krajnje precizna objašnjenja svih promatranja, kao i predviđanja koja su potvrđena nebrojeno mnogo puta u svakojakim situacijama. Kao što smo istaknuli, motiv da se ta eksperimentima potvrđena teorija dovede u pitanje bilo je njezino svojstvo trenutnog prijenosa gravitacijske sile, koje je u sukobu sa specijalnom teorijom relativnosti.

Učinci specijalne relativnosti, iako su presudni za osnovno razumijevanje prostora, vremena i gibanja, ekstremno su maleni u svijetu male brzine u kojemu živimo. Slično tome, odstupanja Einsteinove opće teorije relativnosti – teorije gravitacije uskladive sa specijalnom teorijom relativnosti

– od Newtonove teorije gravitacije u većini uobičajenih situacija također su ekstremno malena. To je i dobro i loše. Dobro je jer se svaka teorija koja podupire ili nadopunjava Newtonovu teoriju gravitacije i treba slagati s njom kad se primjenjuje na onim područjima na kojima je Newtonova teorija provjerena eksperimentima. Loše je jer je zbog toga teže eksperimentima se odlučiti za jednu ili drugu teoriju. Za razlikovanje Newtonove i Einsteinove teorije potrebna su krajnje precizna mjerenja, i to u eksperimentima koji otkrivaju načine na koje se te dvije teorije razlikuju. Ako bacite bejzbolsku lopticu, i Newtonova i Einsteinova gravitacija mogu predvidjeti gdje će ona pasti, i njihovi odgovori će se razlikovati, ali razlike će biti tako sićušne da ih uglavnom uopće ne možemo izmjeriti u eksperimentu. Potreban nam je lukaviji eksperiment, i Einstein je predložio jedan takav.[10]

Noću vidimo zvijezde, ali one su tu i po danu. Obično ih ne vidimo jer njihovu daleku, točkastu svjetlost nadjačava svjetlost Sunca. No za vrijeme pomrčine Sunca Mjesec pri-

vremeno zapreČuje Sunčevu svjetlost i daleke zvijezde po-

---

10 Sredinom devetnaestog stoljeća francuski znanstvenik Urbain Jean Joseph Le Verrier otkrio je da planet Merkur blago odstupa od orbite oko Sunca koju predviđa Newtonov zakon gravitacije. Više od pola stoljeća su objašnjenja za to, takozvano odstupanje od orbitalnog perihela (običnim jezikom rečeno, Merkur na kraju orbite nije bio ondje gdje je Newtonova teorija rekla da bi trebao biti) obuhvaćala su cijeli raspon ideja – gravitacijski utjecaj neotkrivenog planeta ili planetarnog prstena, neotkriveni mjesec, učinak interplanetarne prašine, plosnatost Sunca – ali nijedno nije bilo dovoljno uvjerljivo da bi ga se prihvatilo. Godine 1915. Einstein je izračunao precesiju perihela služeći se svojim novootkrivenim jednadžbama opće teorije relativnosti i došao do odgovora zbog kojeg je, po vlastitom priznanju, dobio srčane palpitacije: rezultat na temelju opće teorije relativnosti precizno se poklapao s opažanjima. Dakako, taj uspjeh bio je važan razlog za Einsteinovu vjeru u vlastitu teoriju, ali gotovo svi ostali čekali su potvrdu nekog predviđanja, a ne objašnjenje već poznate anomalije. Više o tome u: Abraham Pais, *Subtle Is the Lord* (New York: Oxford University Press, 1982), str. 253.

staju vidljive. No ipak, prisutnost Sunca ima utjecaja. Svjetlost nekih dalekih zvijezda na putu do Zemlje mora proći blizu Sunca. Einsteinova opća teorija relativnosti predviđa da će Sunce uviti okolni prostor i vrijeme, a to izobličenje *utjecat će na putanju zvjezdane svjetlosti*. Uostalom, fotoni izdaleka putuju tkivom univerzuma; ako je to tkivo uvijeno, ono će utjecati na gibanje fotona kao i na materijalno tijelo. Savijanje putanje svjetlosti najveće je za one svjetlosne signale koji na putu prema Zemlji tek okrznu Sunce. Pomrčina Sunca omogućuje da vidimo tu svjetlost koja okrzne Sunce, jer je Sunčeva svjetlost neće posve prikriti.

Kut pod kojim se savija putanja svjetlosti može je jednostavno izmjeriti. Savijanje putanje zvjezdane svjetlosti stvara pomak u *prividnom* položaju zvijezde. Taj pomak može se precizno izmjeriti usporedbom tog prividnog položaja sa *stvarnim* položajem zvijezde koji nam je poznat po njenim promatranjima noću (bez Sunčeva uvijanja), provedenim kad je Zemlja u odgovarajućem položaju, oko šest mjeseci

prije ili poslije eksperimenta. U studenom 1915. Einstein se poslužio svojim novim razumijevanjem gravitacije kako bi izračunao kut pod kojim bi se savili signali zvjezdane svjetlosti koji tek okrznu Sunce i došao je do rezultata da bi taj kut bio oko 0,00049 stupnja (ili 1,75 lučnih sekundi, pri čemu je sekunda 1/3600 stupnja). Taj sićušni kut jednak je onom pod kojim bismo vidjeli novčić od 25 centi s udaljenosti od oko tri kilometra. No, taj maleni kut mogao se izmjeriti tehnologijom onoga doba. Na poticaj Sir Franka Dysona, upravitelja zvjezdarnice Greenwich, Sir Arthur Eddington, poznati astronom i tajnik Kraljevskog astronomskog društva u Engleskoj, organizirao je ekspediciju na otok Principe, u blizini obale zapadne Afrike kako bi testirao Einsteinovo predviđanje za vrijeme pomrčine Sunca 29. svibnja 1919.

Dana 6. studenog 1919, nakon nekih pet mjeseci analize fotografija snimljenih za vrijeme pomrčine na otoku Principe (i drugih fotografija pomrčine, koje je snimila druga

britanska ekipa pod vodstvom Charlesa Davidsona i Andrewa Cromelina u Sobralu, u Brazilu), na zajedničkoj sjednici Kraljevskog društva i Kraljevskog astronomskog društva objavljeno je da je Einsteinovo predviđanje na temelju opće teorije relativnosti potvrđeno. Nije bilo potrebno dugo da se glas o tom uspjehu – koji je stare pojmove prostora i vremena postavio naglavce – proširi izvan granica zajednice fizičara, pa je Einstein postao slavan diljem svijeta. Dana 7. studenog 1919. naslov u londonskom *Timesu* glasio je: REVOLUCIJA U ZNANOSTI – NOVA TEORIJA UNIVERZUMA – NEWTONOVE IDEJE SVRGNUTE".[11] Bio je to Einsteinov trenutak slave.

U godinama nakon tog eksperimenta Eddingtonova potvrda opće teorije relativnosti bila je podvrgnula kritičkom ispitivanju. Nije bilo lako ponoviti brojne teške i istančane aspekte mjerenja, što je potaknulo neka pitanja o vjerodostojnosti izvornog eksperimenta. No ipak, proteklih 40 godina mnogi raznoliki eksperimenti koji su se poslužili na-

prednijom tehnologijom s velikom su preciznošću testirali brojne aspekte opće relativnosti. Predviđanja opće teorije relativnosti jednoglasno su potvrđena. Više nema nikakve dvojbe da Einsteinov opis gravitacije nije samo uskladiv sa specijalnom teorijom relativnosti nego i daje predviđanja koja su bliža rezultatima eksperimenata nego što su to predviđanja Newtonove teorije.

Crne rupe, Veliki prasak i širenje svemira

Dok je specijalna teorija relativnosti najočitija kad se stvari gibaju brzo, opća teorija relativnosti dolazi na svoje kad su stvari vrlo masivne i uvijanje prostora i vremena odgovarajuće jako. Opišimo dva primjera.

---

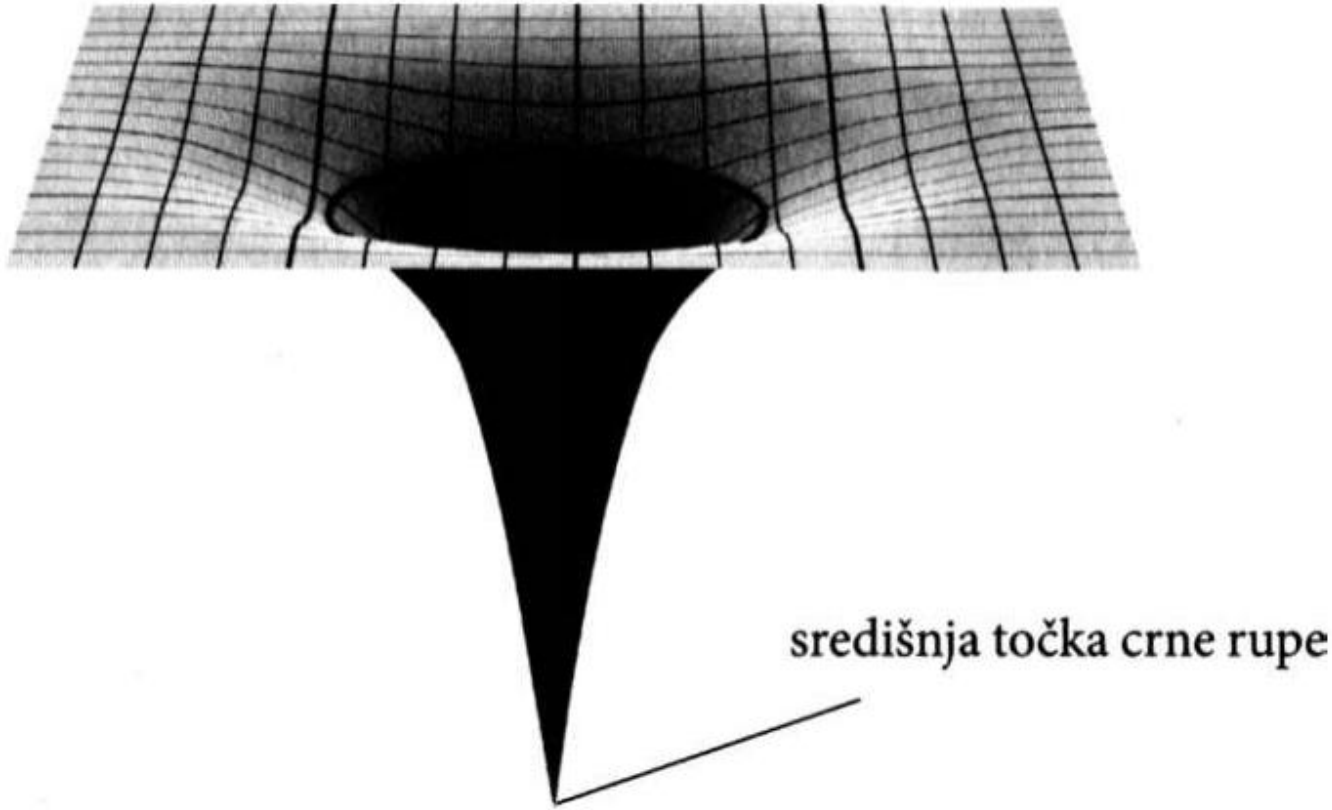
11 Robert P. Crease i Charles C. Mann, *The Second Creation* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996), str. 39.

Prvi primjer je otkriće njemačkog astronoma Karla Schwarzschilda, koji je proučavao Einsteinova otkrića o gravitaciji dok se odmarao od svojih proračuna trajektorija artiljerijskih granata na istočnoj fronti u 1. svjetskom ratu 1916. Tek nekoliko mjeseci nakon što je Einstein doradio opću teoriju relativnosti, Schwarzschild je uspio upotrijebiti tu teoriju kako bi došao do potpunog i egzaktnog razumijevanja kako se prostor i vrijeme uvijaju u blizini savršeno kuglaste zvijezde. Schwarzschild je s istočne fronte poslao svoje rezultate Einsteinu, koji ih je u Schwarzschildovo ime iznio pred pruskom Akademijom.

Osim što je potvrdio i matematički precizno izrazio uvijanje koje je shematski prikazano na slici 3.5, Schwarzschildov rad – koji je postao poznat kao "Schwarzschildovo rješenje" otkrio je zapanjujuću implikaciju opće teorije relativnosti. Dokazao je da, ako je masa zvijezde koncentrirana u dovoljno malenom području kugle, tako da njezina masa podijeljena s polumjerom prelazi određenu kritičnu

vrijednost, tako nastalo uvijanje prostorvremena bit će tako radikalno da *ništa*, uključujući i svjetlost, što se previše približi zvijezdi neće moći izmaknuti njezinom gravitacijskom škripcu. Budući da čak ni svjetlost ne može pobjeći takvim "komprimiranim zvijezdama", na početku ih se nazivalo *tamnim* ili *zamrznutim zvijezdama*. Godinama potom John Wheeler smislio je pamtljiviji naziv nazvavši ih crnim rupama – crnim zato što ne emitiraju svjetlost, a rupama zato što sve što im se previše približi pada u njih i nikada se ne vraća. I ime se zadržalo.

Schwarzschildovo rješenje ilustriramo na slici 3.7. Iako crne rupe imaju ugled proždrljivosti, tijela koja prolaze pokraj njih na "sigurnoj" udaljenosti mijenjaju putanju na isti način kao i kad je riječ o svakoj drugoj, običnoj zvijezdi, i veselo nastavljaju svojim putem. Ali tijela bilo kojeg sastava koja se previše približe – bliže od takozvanoga *horizonta događaja* crne rupe – osuđena su na propast: bit će nesmi-



Slika 3.7 Crna rupa uvija tkivo okolnog prostorvremena tako jako da ništa što uđe unutar njezina "horizonta događaja" – ilustriranog tamnim krugom – ne može izbjeći njezinu gravitacijskom stisku. Nitko ne zna točno što se događa u najdubljoj unutarnjoj točki crne rupe.

ljeno privučena u središte crne rupe i podvrgnuta sve jačem gravitacijskom rastezanju koje će ih uništiti. Na primjer, kad

biste prvo nogom zakoračili preko horizonta događaja, približavajući se središtu crne rupe osjećali biste se sve neugodnije. Gravitacijska sila crne rupe bi se povećavala tako dramatično da bi privlačenje vaših nogu bilo mnogo jače nego privlačenje vaše glave (jer u padu s nogama prema dolje stopala su vam malo bliže središtu crne rupe nego glava); zapravo, toliko jače da bi vam tijelo bilo rastegnuto silom koja bi ga brzo rastrgala na komadiće.

Suprotno tome, ako ste bili razumni u svojim lutanjima u blizini crne rupe i dobro pazili da ne prijeđete horizont događaja, crnu rupu biste mogli iskoristiti za prilično impresivan pothvat. Na primjer, zamislite da ste otkrili crnu rupu čija masa je oko 1000 puta veća od mase Sunca i spuštate se na kablu, kao George prema Suncu, do oko dva i pol centimetra iznad horizonta događaja te crne rupe. Kao što smo raspravili, gravitacijska polja uvijaju vrijeme, a to znači da bi se vaše prolaženje kroz vrijeme usporilo. Zapravo, budući da crne rupe imaju tako jako gravitacijsko polje, vaše prolaženje

kroz vrijeme *itekako* bi se usporilo. Vaš sat otkucavao bi oko deset tisuća puta sporije od satova vaših prijatelja na Zemlji. Kad biste godinu dana tako visjeli nad horizontom događaja crne rupe i potom se popeli uz kabel prema svom svemirskom brodu i krenuli na kratko, turističko putovanje kući, po dolasku na Zemlju otkrili biste da je ondje proteklo više od deset tisuća godina od vašeg odlaska. Tako biste uspješno upotrijebili crnu rupu kao svojevrsni vremeplov koji vam je omogućio da otputujete u daleku budućnost Zemlje.

Da bismo dobili dojam o ekstremnim razmjerima o kojima je tu riječ, zvijezda mase Sunca bila bi crna rupa kad njen polumjer ne bi bio kakav doista jest (oko 724 000 kilometara) nego tek nešto manje od tri kilometra. Zamislite: cijelo Sunce zgusnuto tako da stane na sjeverni Manhattan. Čajna žlica tako zgusnuta Sunca težila bi kao Mount Everest. Kad bismo Zemlju pretvorili u crnu rupu, morali bismo je nagurati u kuglu polumjera manjeg od centimetra. Fizičari dugo nisu vjerovali da bi tako ekstremna stanja ma-

terije ikad mogla nastati i mnogi su mislili da su crne rupe tek proizvod mašte izmoždenih teoretičara.

Međutim, proteklih deset godina gomilaju se sve uvjerljiviji dokazi o postojanju crnih rupa. Naravno, budući da su crne, ne može ih se izravno zamijetiti pretražujući nebo teleskopima. Umjesto toga, astronomi traže crne rupe tražeći anomalije u ponašanju drugih, običnijih zvijezda koje emitiraju svjetlost, a možda su blizu horizonta događaja kakve crne rupe. Na primjer, dok prašina i plin iz vanjskih slojeva obližnje obične zvijezde padaju prema horizontu događaja crne rupe, bivaju ubrzani gotovo do brzine svjetlosti. Pri takvim brzinama, trenje unutar vrtloga tvari koja pada stvara ogromnu količinu topline pa smjesa prašine i plina "sja", emitirajući i običnu, vidljivu svjetlost i rendgenske zrake. Budući da to zračenje nastaje tik izvan horizonta događaja, ono uspijeva pobjeći od crne rupe i krenuti na putovanje svemirom kako bi ga se moglo zapaziti i izravno

proučiti. Teorija opće relativnosti daje detaljna predviđanja o tome kakva će svojstva imati te emisije rendgenskih zraka; promatranja tih predviđenih svojstava pružaju jake, premda neizravne dokaze o postojanju crnih rupa. Na primjer, sve više dokaza upućuje na to da postoji vrlo masivna crna rupa, oko dva i pol milijuna puta masivnija od Sunca, u samom središtu naše galaksije Mliječni put. No čak i ta, naizgled orijaška crna rupa blijedi u usporedbi s onima koje, kako astronomi vjeruju, borave u jezgrama zadivljujuće svijetlih kvazara, raspršenih diljem svemira: mase tih crnih rupa mogle bi iznositi i *milijarde* Sunčevih masa.

Schwarzschild je umro samo nekoliko mjeseci nakon što je pronašao svoje rješenje, od kožne bolesti kojom se zarazio na istočnoj fronti. Imao je 42 godine. Njegov tragično kratak susret s Einsteinovom teorijom gravitacije otkrio je jedno od najdojmljivijih i najtajanstvenijih obilježja svijeta prirode.

Drugi primjer u kojemu opća teorija relativnosti po-

kazuje mišiće je porijeklo i evolucija cijeloga univerzuma. Kao što smo vidjeli, Einstein je dokazao da prostor i vrijeme reagiraju na prisutnost mase i energije. To izobličenje prostorvremena utječe na gibanje drugih svemirskih tijela u blizini tako nastalih uvoja. Isto tako, upravo način na koji se ta tijela gibaju, zbog svoje mase i energije, dodatno utječe na uvijanje prostorvremena, što pak dalje utječe na gibanje tijela, i tako dalje, u međupovezanom kozmičkom plesu. Jednadžbama opće teorije relativnosti, jednadžbama ukorijenjenim u geometrijske spoznaje o zakrivljenom prostoru koje je prvi razrađivao veliki njemački matematičar iz devetnaestog stoljeća Georg Bernhard Riemann (o Riemannu će ovdje još biti riječi), Einstein je uspio kvantitativno opisati uzajamnu evoluciju prostora, vremena i materije. Na svoje veliko iznenađenje, kad je primijenio te jednadžbe izvan izoliranoga konteksta unutar univerzuma, kao što je planet ili komet koji orbitira oko zvijezde, dakle kad ih je primije-

nio na cijeli univerzum, došao je do neočekivana zaključka: *ukupna prostorna veličina univerzuma mora se mijenjati s vremenom*. Naime, tkivo univerzuma se ili rasteže ili steže, a ne ostaje kakvo jest. Jednadžbe opće teorije relativnosti jasno to pokazuju.

Taj zaključak bio je previše čak i za Einsteina. Postavio je naglavce našu kolektivnu intuiciju o prirodi prostora i vremena, građenu tisućama godina na temelju naših svakodnevnih iskustava. Shvaćanje o uvijek postojećem, nepromjenjivom univerzumu bilo je prejako ukorijenjeno da bi ga odbacio čak i taj radikalni mislilac. Zato je Einstein revidirao svoje jednadžbe i promijenio ih time što je uveo takozvanu kozmološku konstantnu, dodatnu vrijednost koja mu je omogućila da izbjegne svoja predviđanja i uživa u utjesi statičnog univerzuma. No, 12 godina poslije, detaljnim mjerenjem dalekih galaksija, američki astronom Edwin Hubble eksperimentima je ustanovio da se univerzum doista *širi*. U priči koja je slavna u analima znanosti Einstein se

tada vratio svojim jednadžbama u izvornom obliku, a svoje privremene modifikacije naveo je kao svoju najveću životnu pogrešku.[12] Bez obzira na njegovu početnu nespremnost da prihvati taj zaključak, Einsteinova teorija predvidjela je širenje univerzuma. Zapravo, početkom 1920-ih – godinama prije Hubbleovih mjerenja – ruski meteorolog Aleksandar Fridman poslužio se izvornim Einsteinovim jednadžbama kako bi pokazao, donekle egzaktno, da bi sve galaksije bile nošene na supstratu tkiva prostora u širenju, te bi se stoga brzo međusobno udaljavale. Hubbleova promatranja i mnoga koja su uslijedila u potpunosti su potvrdila taj iznenađujući zaključak opće teorije relativnosti. Ponudivši objašnjenje za širenje svemira, Einstein je ostvario jedan od najvećih intelektualnih pothvata svih vremena.

---

12 Začudo, novija istraživanja o preciznoj stopi širenja svemira naznačuju da bi svemir doista mogao sadržavati vrlo malenu kozmološku konstantu, dakle, ipak različitu od nule.

Ako se tkivo prostora rasteže i tako povećava udaljenost između galaksija koje su nošene na toj kozmičkoj struji, onda možemo u mislima odviti evoluciju unatrag i doći do nastanka univerzuma. I obratno, gledamo li unatrag u vrijeme, tkivo prostora se steže i sve galaksije se međusobno približavaju. Poput sadržaja ekspres-lonca, budući da svemir koji se steže zbija galaksije i temperatura dramatično raste, zvijezde se raspadaju i nastaje vruća plazma koja se sastoji od elementarnih sastojaka materije. Kako se tkivo i dalje steže, temperatura neometano raste, kao i gustoća primordijalne plazme. Dok zamišljamo kako sat otkucava oko 15 milijardi godina unatrag od vremena univerzuma kakav danas promatramo, univerzum kakav poznajemo sve se više smanjuje. Materiju koja tvori sve – svaki automobil, kuću, zgradu, samu Zemlju, Mjesec, Saturn, Jupiter i sve druge planete, Sunce i sve druge zvijezde u Mliječnom putu, galaksiju Andromedu s njezinih 100 milijardi zvijezda i svih drugih 100 milijardi galaksija – kozmički škripac steže do

nevjerojatne gustoće. A kako se sat vraća u sve ranije vrijeme, cijeli svemir se sažima do veličine naranče, limuna, graška, zrna pijeska, i na još manju veličinu. Ekstrapoliramo li taj proces sve do "početka", činilo bi se da je svemir počeo kao *točka* – tu sliku ćemo kritički istražiti u kasnijim poglavljima – u kojoj je sva materija i sva energija sažeta do nezamislive gustoće i temperature. Vjeruje se da je kozmička eksplozija, Veliki prasak, erumpirala iz te zapaljive smjese koja je posijala sjemenje svemira koji se razvio u ovaj koji poznajemo.

Sliku Velikog praska kao kozmičke eksplozije koja je izbacila materijalni sadržaj svemira poput šrapnela bombe korisno je imati na umu, ali ona ipak donekle upućuje u krivom smjeru. Kad eksplodira bomba, to se dogodi na određenom položaju *u prostoru* i u određenom trenutku *u vremenu*. Njezin sadržaj se raspršti u okolnom prostoru. U Velikom prasku nije bilo nikakva okolnog prostora. Kako

uvijamo univerzum unatrag prema početku, sažimanje cjelokupnog materijalnog sadržaja događa se jer se *sav prostor* smanjuje. Devolucija na veličinu naranče, graška i zrna pijeska opisuje *cijeli* univerzum – a ne nešto unutar njega. Ako dođemo do samog početka, jednostavno ne postoji nikakav prostor izvan primordijalne točkaste granate. Veliki prasak je erupcija komprimiranog prostora, čije odvijanje poput plimnog vala nosi materiju i energiju sve do danas.

Je li opća teorija relativnosti ispravna?

U eksperimentima izvedenima na današnjoj razini tehnologije nema nikakvih odstupanja od predviđanja opće teorije relativnosti. Samo vrijeme će reći hoće li veća preciznost izvođenja eksperimenata na kraju otkriti i neka odstupanja i tako pokazati da je i ta teorija samo približan opis stvarnog mehanizma prirode. Sustavno testiranje teorija na sve višim

razinama preciznosti zasigurno je jedan od načina kojima znanost napreduje, ali nije jedini. Zapravo, to smo već vidjeli; potraga za novom teorijom gravitacije nije započela eksperimentalnim pobijanjem Newtonove teorije nego sukobom Newtonove gravitacije s drugom *teorijom* – specijalnom teorijom relativnosti. Tek nakon otkrića opće teorije relativnosti kao suparničke teorije gravitacije, eksperimentima su otkriveni nedostaci Newtonove teorije, i to traženjem sićušnih, ali mjerljivih razlika između dviju teorija. Dakle, za ostvarenje napretka mogu biti presudne i unutarnje nedosljednosti u teoriji, ne manje nego podaci dobiveni eksperimentima.

Proteklih pola stoljeća fizika se suočava s još jednim sukobom između teorija, čija oštrina nije manja od onoga između specijalne teorije relativnosti i Newtonove gravitacije. Čini se da je opća teorija relativnosti u biti neusklađiva s drugom, također itekako dobro prokušanom teori-

jom: *kvantnom mehanikom*. S obzirom na građu obrađenu u ovom poglavlju, taj sukob sprečava fizičare da razumiju što se uistinu događa s prostorom, vremenom i materijom kad su potpuno zgusnute u trenutku Velikog praska ili u središnjoj točki crne rupe. No, govoreći općenitije, taj sukob upozorava nas na osnovni nedostatak našeg poimanja prirode. Razrješenje tog sukoba nam izmiče usprkos pokušajima nekih od najvećih teorijskih fizičara i stoga je steklo ugled glavnog problema moderne teorijske fizike. Da bismo razumjeli taj sukob, moramo se upoznati s nekim osnovnim obilježjima kvantne teorije, kojoj ćemo se sada posvetiti.

ČETVRTO POGLAVLJE

Mikroskopska čudnovatost

Pomalo umorni od ekspedicija izvan Sunčeva sustava, George i Gracie vraćaju se na zemlju i odlaze u Precrtano h na malo osvježenja nakon svemirskih tegoba. George naručuje uobičajeno – sok od papaje za sebe i votka-tonik za Gracie – te se zavaljuje u naslonjač i sklapa ruke iza glave kako bi uživao u upravo zapaljenoj cigari. No prije nego što je stigao

udahnuti prvi dim, zaprepašteno shvaća da mu cigara više nije među zubima. Pomislivši da mu je cigara zacijelo ispala iz usta, George se naginje naprijed, očekujući da mu je već izbušila rupu u košulji ili hlačama. No, nema je. Nigdje je nema. Gracie, potaknuta Georgeovim grozničavim kretnjama, baca pogled i uočava cigaru na šanku *iza* Georgeovog naslonjača. "Čudno", kaže George, "kako li je samo mogla pasti onamo? To je kao da mi je prošla kroz glavu – ali jezik mi nije opečen i nemam nikakvih novih rupa". Gracie pregleda Georgea i nevoljko potvrdi da su mu i jezik i glava posve normalni. Stižu pića i George i Gracie sliježu ramenima i tumače palu cigaru kao još jednu malu životnu tajnu. No, čudnovatosti u *Precrtanom h* se nastavljaju.

George pogleda u svoj sok od papaje i uočava da ledene kockice neumorno zvekeću – udaraju jedna o drugu i u stijenke čaše, poput friziranih automobila koji se sudaraju u areni. Ovaj put nije sam. Gracie podiže svoju čašu, koja je oko dvaput manja od Georgeove, i oboje vide da i njezine

kockice leda zvekeću, još žustrije od njegovih. Jedva da uopće mogu razabrati pojedinačne kockice jer se one stapaju u ledenu masu. No ništa od toga ne može se usporediti s onim što se potom događa. Dok George i Gracie širom otvorenih očiju zure u njezino zveketavo piće, vide kako jedna ledena kockica *prolazi kroz* stijenku čaše i pada na šank. Oni uhvate čašu i vide da je netaknuta; ledena kocka nekako je prošla kroz čvrsto staklo a da nije napravila nikakvo oštećenje. "Ovo su sigurno halucinacije starih svemirskih putnika", kaže George. Oboje se odupiru iskušenju da popiju svoja pića naiskap i polaze kući ne bi li se oporavili. Uopće nisu shvatili da su u grozničavoj žurbi zamijenili dekorativna vrata, nacrtana na zidu bara, za prava vrata. No, mušterije *Precrtanog h* navikle su na to da ljudi prolaze kroz zidove i gotovo nisu ni primijetili Georgeov i Gracien nagli odlazak.

Prije stotinu godina, kad su Joseph Conrad i Sigmund Freud osvjetljavali srce i dušu tame, njemački fizičar Max Planck bacio je prvu zraku svjetla na kvantnu mehaniku,

pojmovni okvir koji proglašava, između ostaloga, da se iskustva Georgea i Gracie u *Precrtanom h* – kad ih se smanji do mikroskopskih razmjera – ne moraju pripisati njihovim uzdrmanim mentalnim sposobnostima. Tako neobična i bizarna događanja tipična su za stvarno ponašanje našeg univerzuma u ekstremno malenim razmjerima.

Kvantni okvir

Kvantna mehanika je pojmovni okvir za razumijevanje mikroskopskih svojstava univerzuma. I upravo kao što specijalna i opća teorija relativnosti zahtijevaju dramatične promjene u našem svjetonazoru kada se stvari gibaju vrlo brzo ili kada su vrlo masivne, kvantna mehanika otkriva da univerzum ima jednako, ako ne i još više zapanjujuća svojstva kad ga se istražuje na atomskim i subatomskim udaljenosti-

ma. Richard Feynman, jedan od najvećih znalaca kvantne mehanike, 1965. napisao je:

> Nekoć su novine pisale da samo dvanaest ljudi razumije teoriju relativnosti. Ja ne vjerujem da je ikad bilo tako. Možda ju je u jednom trenutku razumio samo jedan čovjek jer ju je on shvatio prije nego što je napisao svoj rad. No, nakon što su ljudi pročitali taj članak, mnogi su razumjeli teoriju relativnosti, zasigurno više od dvanaest njih. S druge strane, mislim da sa sigurnošću mogu reći da kvantnu mehaniku ne razumije nitko.[1]

Iako je Feynman izrazio to gledište prije više od trideset godina, ono jednako tako vrijedi i danas. Želio je reći da, iako specijalna i opća teorija relativnosti zahtijevaju drastičnu promjenu starih načina viđenja svijeta, kad u potpunosti prihvatimo principe u njihovoj osnovi, nove i neobične implikacije za prostor i vrijeme slijede izravno iz pomnog logičkog razmišljanja. Ako se dovoljno marljivo udubite u opise Einsteinova rada u prethodna dva poglavlja, shvatit

ćete – barem na trenutak – da su zaključci koje smo izveli neizbježni. Kvantna mehanika je drukčija. Oko 1928. bile su postavljene mnoge matematičke formule i pravila kvantne mehanike, i otad služe za najpreciznija i najuspješnija numerička predviđanja u povijesti znanosti. Ali u stvarnom smislu, oni koji se služe kvantnom mehanikom slijede pravila i formule koje su iznašli "očevi osnivači" teorije – računskim postupkom koji je lako obaviti – ne razumijevajući doista *zašto* su ti postupci uspješni i *što* doista znače. Za razliku od relativnosti, malo je ljudi, ako takvih uopće ima, razumjelo kvantnu mehaniku "u dušu".

Što bismo mogli zaključiti na temelju toga? Znači li to da na mikroskopskoj razini univerzum funkcionira na tako neobične i neshvatljive načine da ljudski um, koji je eonima evoluirao kako bi se nosio s pojavama poznatih, svakod-

---

1 Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965), str. 129.

nevnih razmjera, nije sposoban u potpunosti shvatiti "što se doista događa"? Ili, je li moguće da su fizičari nekakvom povijesnom slučajnošću izgradili ekstremno nespretnu formulaciju kvantne mehanike koja, iako je kvantitativno uspješna, prikriva pravu prirodu stvarnosti? To nitko ne zna. Možda će jednom u budućnosti netko pametan jasno vidjeti novu formulaciju koja će u potpunosti otkriti ono "zašto" i ono "što" u kvantnoj mehanici. No, možda i neće. Pouzdano znamo samo da nam kvantna mehanika apsolutno i jednoznačno dokazuje da velik broj osnovnih pojmova, bitnih za naše razumijevanje poznatoga, svakodnevnog svijeta, *nema nikakvo značenje* kad se usredotočimo na mikroskopsko područje. Zato moramo značajno izmijeniti i naš jezik i našu logiku kad pokušavamo razumjeti i objasniti univerzum na atomskoj i subatomskoj razini.

U sljedećim odjeljcima razvit ćemo osnove tog jezika i opisati nekoliko velikih iznenađenja koje on donosi. Ako vam se kvantna mehanika pritom učini bizarnom ili čak ap-

surdnom, imajte na umu dvije stvari. Prvo, osim činjenice da je to matematički koherentna teorija, jedini razlog zašto vjerujemo u kvantnu mehaniku je to što ona daje predviđanja koja se potvrđuju do zapanjujuće preciznosti. Kad bi vam netko pripovijedao cijele knjige preciznih pojedinosti o vašem djetinjstvu, teško bi vam bilo ne povjerovati da je to vaš davno izgubljeni brat. Drugo, niste jedini koji tako reagiraju na kvantnu mehaniku. Na tom stajalištu u većoj ili manjoj mjeri stoje neki od najpoštovanijih fizičara svih vremena. Einstein je odbijao u potpunosti prihvatiti kvantnu mehaniku. Čak i Niels Bohr, jedan od najvažnijih utirača putova kvantne teorije i jedan od njenih najjačih zastupnika, jednom je napomenuo da, ako vam se ne zavrti u glavi kad razmišljate o kvantnoj mehanici, onda je niste doista shvatili.

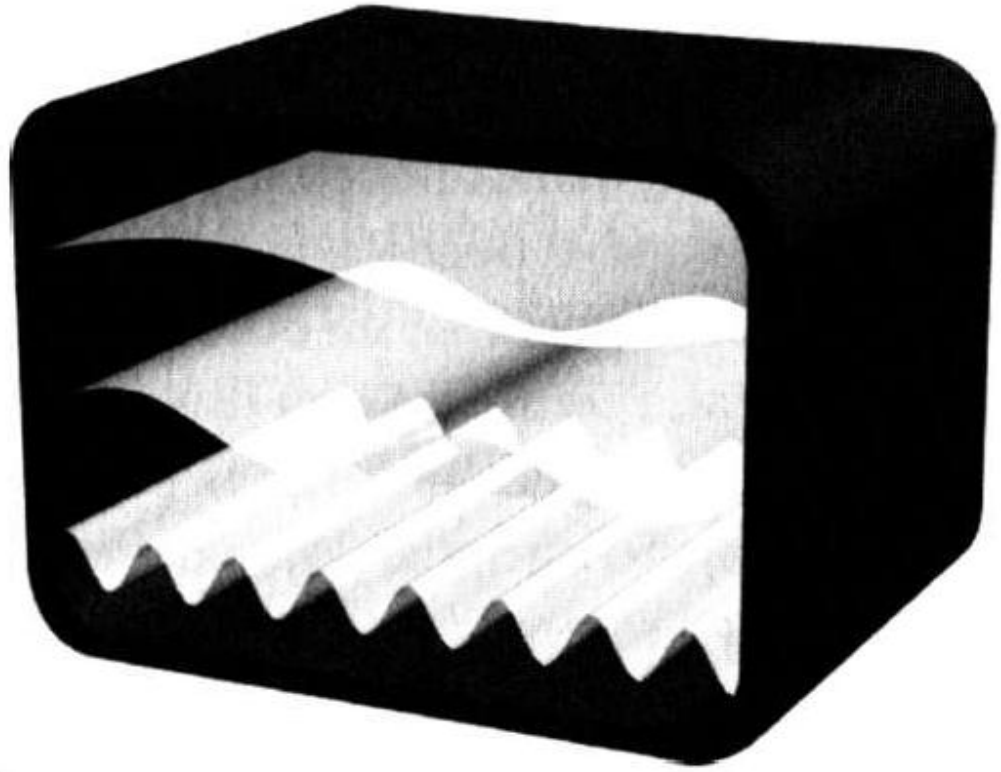
U kuhinji je prevruće

Put prema kvantnoj mehanici počeo je zagonetnim problemom. Zamislite da vam je pećnica u kući savršeno pravilno instalirana, da ste je postavili na određenu temperaturu, recimo 200 stupnjeva, i da ste joj dali dovoljno vremena da se zagrije. Čak i ako ste isisali sav zrak iz pećnice prije nego što ste je uključili, njene ugrijane stijenke stvaraju zračenje u unutrašnjosti. To je ista vrsta zračenja – toplina i svjetlost u obliku elektromagnetskih valova – koju emitira površina Sunca ili željezni žarač ugrijan do usijanja.

Evo u čemu je problem. Elektromagnetski valovi prenose energiju – na primjer, sav život na Zemlji ovisi o Sunčevoj energiji koju od Sunca do Zemlje prenose elektromagnetski valovi. Početkom dvadesetog stoljeća fizičari su izračunali ukupnu energiju koju prenosi cjelokupno elektromagnetsko zračenje unutar pećnice na određenoj temperaturi. Služeći se provjerenim računskim postupcima, došli su do besmi-

slenog rješenja: za svaku temperaturu, ukupna energija u pećnici je *beskonačna*.

Svima je bilo jasno da to nema smisla – vruća pećnica može sadržavati znatnu količinu energije, ali ne beskonačnu. Da bismo razumjeli rješenje koje je predložio Planck, dobro je malo detaljnije proučiti cijeli taj problem. Pokazalo se da, kad se Maxwellova elektromagnetska teorija primijeni na zračenje u pećnici, pokazuje se da valovi koje stvaraju vruće stijenke moraju imati cijeli broj vrhova i dolova koji se savršeno uklapaju između suprotnih površina. Neke primjere prikazali smo na slici 4.1. Fizičari te valove opisuju trima pojmovima: valna duljina, frekvencija i amplituda. *Valna duljina* je udaljenost između dva vrha ili dva dola vala, što je ilustrirano na slici 4.2. Više vrhova i dolova znači kraću valnu duljinu jer ih se sve mora nagurati između fiksiranih stijenki pećnice. *Frekvencija* se odnosi na broj ciklusa titranja koje val obavi svake sekunde. Pokazuje se da frekvenciju

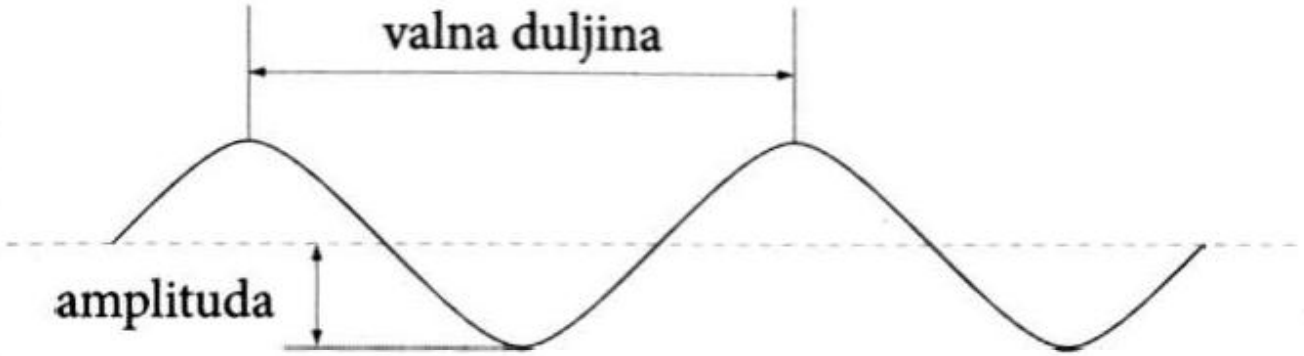


Slika 4.1 Maxwellova teorija kazuje nam da valovi zračenja u pećnici imaju cijeli broj vrhova i dolova – čini potpune valne cikluse.

određuje valna duljina i obratno: veća valna duljina znači nižu frekvenciju, a manja valna duljina znači višu frekvenciju. Da bismo vidjeli zašto je to tako, zamislimo što se događa kad stvarate valove tresući dugačko uže koje je privezano na jednom kraju. Da biste stvorili dugačak val, blago mašete

svojim krajem užeta. Frekvencija vala odgovara broju ciklusa, zamaha u sekundi koji obavi vaša ruka i stoga je prilično niska. No da biste stvorili kraće valove, morate brže mahati rukom – frekventnije, da tako kažemo – jer to stvara valove više frekvencije. Na kraju, fizičari se služe pojmom *amplitude* kako bi opisali maksimalnu visinu ili dubinu vala, što je također ilustrirano na slici 4.2.

Ako su vam elektromagnetski valovi pomalo apstraktni, druga dobra analogija koju treba imati na umu su valovi koji nastaju prebiranjem violinskih žica. Različite valne frekvencije odgovaraju različitim muzičkim notama: što je viša frekvencija, to je viša i nota. Amplituda vala na violinskoj žici određena je time koliko jako ste je jako potegnuli kad ste je zatitrali. Ako ste je jače potegnuli, to znači da ste uložili više energije u valni poremećaj; više energije odgovara većoj amplitudi. To se i čuje: ton je glasniji. Isto tako, manje energije odgovara manjoj amplitudi i slabijoj glasnoći zvuka.



Slika 4.2 Valna duljina je udaljenost između dva vrha ili dola vala. Amplituda je maksimalna visina ili dubina vala.

Služeći se termodinamikom devetnaestog stoljeća, fizičari su uspjeli odrediti koliko energije bi vruće stijenke pećnice unijele u elektromagnetske valove svake dopuštene valne duljine – koliko jako bi, da tako kažemo, "zategnule" svaki val. Rezultat do kojega su došli jednostavno je izreći: svaki dopušteni val – bez obzira na valnu duljinu – nosi istu količinu energije (čiju količinu određuje temperatura pećnice). Drugim riječima, svi mogući valni oblici u pećnici posve su ravnopravni kada je riječ o količini energije koju nose.

Isprva se čini da je to zanimljiv, ali nevažan rezultat. Nije nevažan. On znači propast svega što se smatralo klasičnom

irelevan. On znači propast svega što se smatralo klasičnom fizikom. Razlog je ovaj: iako zahtjev da svi valovi imaju cijeli broj vrhova i dolova isključuje velik broj zamislivih rasporeda valova u pećnici, i dalje ostaje beskonačan broj njih – onih s još više vrhova i dolova. Budući da svaki raspored valova nosi istu količinu energije, njihov beskonačan broj prenosi beskonačnu količinu energije. Na prijelazu stoljeća pojavila se ogromna pukotina u teorijskoj glazuri.

Grudice na prijelazu stoljeća

Planck je 1900. godine nadahnuto pogodio rješenje te zagonetke koje će mu 1918. donijeti Nobelovu nagradu za fiziku.[2]

---

[2] Iako Planckov rad jest riješio zagonetku beskonačne energije, čini se da to nije bio njegov glavni motiv. Planck je zapravo želio razumjeti srodno pitanje: rezultati eksperimenata o tome kako se energija vruće pećnice – preciznije govoreći, "crnog tijela" – ras-

Da bismo stekli dojam o tom rješenju, zamislimo da ste vi i veliko mnoštvo ljudi – "beskonačan" broj – nagurani u prostranu, hladnu zgradu kojom upravlja škrt vlasnik. Na zidu je lijep digitalni termostat koji kontrolira temperaturu, ali vi ste užasnuti iznosima koje vlasnik naplaćuje za grijanje. Ako je termostat namješten na 10 stupnjeva, svatko mora platiti 10 dolara. Ako je namješten na 15 stupnjeva, svatko mora platiti 15 dolara i tako dalje. Shvaćate da, budući da u zgradi živite s beskonačnim brojem stanara, vlasnik će zarađivati beskonačnu svotu novca ako uopće uključi grijanje.

No, potrudili ste se pomnije pročitati vlasnikova pravila plaćanja i uočili ste rupu u njima. Budući da je vlasnik vrlo zaposlen, ne želi uzvraćati ostatak novca, posebno ne beskonačnom broju pojedinačnih stanara. Zato primjenjuje sustav časti. Onaj tko može platiti točno onoliko koliko duguje, taj plati. Ako ne može, onda plati samo onoliko koliko može a da mu vlasnik ne mora vratiti ostatak. I tako, želeći uključiti sve stanare, a pritom izbjeći neumjerene cijene gri-

janja, vi uvjerite ostale stanare da organiziraju novac svih na sljedeći način: jedna osoba nosi sve penije, druga sve novčiće od pet centi, treća sve novčiće od deset centi, četvrta sve novčiće od dvadeset pet centi i tako dalje preko novčanica od jednog dolara, pet dolara, deset dolara, dvadeset, pedeset, stotinu, tisuću, pa sve do još većih (i nepoznatih nam) denominacija. Drsko postavite termostat na 20 stupnjeva i čekate vlasnikov odlazak. Kad vlasnik dođe, osoba koja nosi penije plati prva i uruči mu 8000 novčića. Osoba koja nosi novčiće od pet centi preda mu 1600 njih, osoba koja nosi novčiće od deset centi uplati 800 tih novčića, osoba s dvadesetpeticama obaspe ga s 320 kovanica, osoba s dolarima gurne mu u ruke 80 novčanica, osoba s peticama dobaci mu

---

poređuje na razne valne duljine. Više o povijesti tih istraživanja zainteresirani čitatelj naći će u: Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912* (Oxford, Eng.: Clarendon, 1978).

16 tih novčanica, ona s deseticama preda mu 8 novčanica, osoba s dvadeseticama uruči mu 4, a ona s pedeseticama jednu (jer bi dvije pedesetice iznosile više od cijene grijanja pa bi zahtijevale uzvrat ostatka novca). Ali svi ostali nose samo onu denominaciju – minimalnu "grudicu" novca – koja nadmašuje navedenu cijenu. Stoga ne mogu platiti vlasniku i zato, umjesto da dobije beskonačnu količinu novca kao što je očekivao, vlasnik se mora zadovoljiti s bijednih 690 dolara.

Planck se poslužio sličnom strategijom kako bi smanjio apsurdan rezultat, beskonačnu energiju u pećnici, na neki konačan rezultat. Evo kako. Planck je hrabro pretpostavio da energija koju prenosi elektromagnetski val u pećnici, dolazi u grudicama, poput novca. Energija može iznositi jedan puta neka fundamentalna "energijska denominacija", ili dva puta veća od nje, ili tri puta i tako dalje – i to je to. Kao što ne možete imati jednu trećinu centa niti dva i pol puta dvadeset pet centi, tako je Planck objavio da razlomci nisu dopu-

šteni ni kad je riječ o energiji. Naše novčane denominacije određuje državna banka Sjedinjenih Država. Tražeći dublje objašnjenje, Planck je predložio da energijsku denominaciju vala – minimalnu grudicu energije koju val može imati – određuje njegova frekvencija. Konkretno, pretpostavio je da je *minimalna* energija koju val može imati *proporcionalna njegovoj frekvenciji:* viša frekvencija (kraća valna duljina) znači veću minimalnu energiju; niža frekvencija (dulja valna duljina) znači manju minimalnu energiju. Grubo rečeno, kao što su blagi oceanski valovi dugački i bezopasni, dok su kratki nagliji i neugodniji, tako je i zračenje duljih valnih duljina po svojoj prirodi manje energično od zračenja kraćih valnih duljina.

Evo i poante: Planckovi izračuni pokazali su da je ta raspodijeljenost dopuštene energije u svakom valu ispravila prethodni apsurdni rezultat o beskonačnoj ukupnoj energiji. Nije teško vidjeti zašto. Kad se pećnica zagrije na neku oda-

branu temperaturu, izračuni utemeljeni na termodinamici devetnaestog stoljeća predviđali su ukupnu energiju kojom svaki val navodno pridonosi cjelini. No, poput onih stanara koji ne mogu pridonijeti svojim dijelom stanarine koju duguju vlasniku zato što je denominacija novčanice koju imaju prevelika, ako je minimalna energija koju određeni val može nositi veća od energije kojom bi trebao pridonositi, ne može je uložiti i ona ostaje potencijalna. Budući da je, prema Plancku, minimalna energija koju val može nositi proporcionalna njegovoj frekvenciji, kako istražujemo sve više frekvencije (kraće valne duljine) valova u pećnici, prije ili kasnije će minimalna energija koju mogu nositi postati veća od očekivanog energijskog doprinosa. Poput stanara u zgradi koji su dobili denominacije veće od pedeset dolara, ni ti valovi sa sve većim frekvencijama ne mogu pridonijeti količinu energije koju je zahtijevala fizika devetnaestog stoljeća. I tako, kao što samo ograničen broj stanara može pridonijeti ukupnom trošku grijanja – pa se plaća konačni

iznos novca – tako i ograničen broj valova može pridonijeti ukupnoj energiji pećnice – što također vodi do ograničene količine ukupne energije. Bilo da je riječ o energiji ili novcu, grudastost osnovnih jedinica – i sve veća veličina tih jedinica kako idemo prema višim frekvencijama ili većim novčanim denominacijama – mijenja beskonačan rezultat u konačan.[3]

Uklonivši očitu besmislenost beskonačnog rezultata, Planck je poduzeo važan korak. No, ono što je doista uvjerilo ljude da je njegovo nagađanje valjano bilo je to što se konačan odgovor koji je taj novi pristup dao za energiju u pećnici spektakularno poklopio s mjerenjima u eksperimen-

---

[3] Malo preciznije rečeno, Planck je dokazao da se valovi čiji minimalni sadržaj energije prelazi njihov *prosječni* energijski doprinos (prema termodinamici devetnaestog stoljeća) eksponencijalno prigušuju. To prigušenje postaje sve oštrije kako istražujemo valove sve veće frekvencije.

tima. Konkretno, Planck je otkrio da podešavanjem *jednog* parametra koji je unio u svoje nove izračune može precizno predvidjeti izmjerenu energiju pećnice za svaku odabranu temperaturu. Taj parametar je faktor proporcionalnosti između frekvencije vala i minimalne grudice energije koju on može imati. Planck je otkrio da taj faktor proporcionalnosti – danas poznat kao Planckova konstanta, koja se označuje $\hbar$ a izgovara "precrtano h" iznosi oko milijardinku milijardinke milijardinke, izraženo svakodnevnim jedinicama.[27] Sićušna vrijednost Planckove konstante znači da je veličina energijskih grudica obično vrlo malena. Zato nam se čini, na primjer, da možemo prouzročiti da se energija vala na violinskoj žici – a time i glasnoća zvuka koji tako nastaje – može kontinuirano mijenjati. No zapravo, energija vala prolazi kroz diskretne korake, *à la* Planck, ali ti koraci su tako maleni da su diskretni skokovi s jedne glasnoće na drugu naizgled glatki prijelazi. Prema Planckovoj tvrdnji, veličina tih skokova energije raste kako se povisuje frekvencija vala

(a valna duljina skraćuje). To je presudna tvrdnja koja razrješava paradoks beskonačne energije.

Kao što ćemo vidjeti, Planckova kvantna hipoteza čini i više osim što nam omogućuje razumjeti sadržaj energije u pećnici. Ona postavlja naglavce velik dio onoga što smatramo očitim o svijetu. Sićušnost $\hbar$ ograničava većinu tih radikalnih odstupanja od običnog života na mikroskopsko područje, ali da je $\hbar$ mnogo veća nego što jest, neobični događaju u *Precrtanom h* zapravo bi bili uobičajeni. Kao što ćemo vidjeti, njihovi mikroskopski pandani itekako su uobičajeni.

Što su te grudice?

Planck nije imao opravdanja za svoj presudni potez uvođenja grudaste energije. Osim činjenice da je tako riješio problem, ni on ni nitko drugi nije mogao ponuditi uvjerljiv

razlog zašto bi to trebalo biti istinito. Kao što je jednom rekao fizičar George Gamow, to je kao da je priroda dopustila nekome da popije cijelu litru piva ili uopće ništa, i nikako drukčije.[4] Einstein je 1905. našao objašnjenje i za tu spoznaju dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1921.

Einstein je svoje objašnjenje smislio udubljujući se u takozvani fotoelektrični efekt. Njemački fizičar Heinrich Hertz je 1887. prvi otkrio da, kad elektromagnetsko zračenje – svjetlost – obasja određene metale, oni emitiraju elektrone. To samo po sebi nije posebno zanimljivo. Metali imaju svojstvo da su neki njihovi elektroni tek labavo vezani unutar atoma (i zato su dobri vodiči električne struje). Kad svjetlost udari u površinu metala, ona predaje energiju, slično kao kad udari u površinu vaše kože i prouzroči da se osjećate toplije. Ta prenesena energija može pobuditi elektrone u metalu, i neki od labavo vezanih među njima mogu biti izbačeni s površine.

No, neobičnost fotoelektričnog efekta postala je očita kad

se bolje proučilo svojstva izbačenih elektrona. Na prvi pogled pomislili biste da, kako se intenzitet svjetlosti – njezina svjetlina – pojačava, tako raste i brzina izbačenih elektrona, jer elektromagnetski val koji dolazi ima više energije. Ali, to se ne događa. Umjesto toga, raste *broj* izbačenih elektrona, a brzina im ostaje ista. S druge strane, eksperimentima je uočeno da brzina izbačenih elektrona doista *raste* ako se poveća *frekvencija* dolazeće svjetlosti, te isto tako, brzina im se smanjuje ako se smanji frekvencija svjetlosti. (Za elektromagnetske valove u vidljivom dijelu spektra porast frekvencije odgovara promjeni boje iz crvene preko narančaste, žute, zelene, plave i indigo u ljubičastu. Frekvencije više od frekvencije ljubičaste nisu vidljive i odgovaraju ultraljubičastim zrakama, koje potom prelaze u rendgenske; frekvencije niže od frekvencije crvene također nisu vidljive i odgovaraju in-

---

[4] Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989), str. 286.

fracrvenom zračenju.) Zapravo, kako se frekvencija svjetlosti smanjuje, dolazi do točke kad brzina emitiranih elektrona pada na nulu i više ne bježe s površine, *bez obzira na možda i zasljepljujuću jačinu izvora svjetlosti*. Iz nekog nepoznatog razloga, *boja* dolazeće svjetlosne zrake – a ne njena ukupna energija – određuje hoće li elektroni biti emitirani, a ako budu, koju će energiju imati.

Da bismo razumjeli kako je Einstein objasnio te zagonetne činjenice, vratimo se u svoju zgradu, koja je sad zagrijana na ugodnih 20 stupnjeva. Zamislimo da vlasnik, koji mrzi djecu, zahtijeva da svi koji su mlađi od petnaest godina žive u podrumu zgrade, koji odrasli mogu promatrati s velikog kružnog balkona. Štoviše, golem broj podrumske djece može izaći iz zgrade samo ako čuvaru plate izlazninu od 85 centi. (Taj vlasnik je grozan čovjek.) Odrasli, koji su na vaš poticaj uredili svoje kolektivno bogatstvo po gore opisanim denominacijama, mogu dati novac djeci samo tako da im ga bace s balkona. Pogledajmo što se tada događa.

Osoba koja nosi penije počinje tako što baci nekoliko njih, ali to je premalen iznos da bi si ijedno dijete moglo priuštiti da plati izlazak, a budući da postoji u biti "beskonačno" more djece koja se sva grčevito bore u strašnoj gužvi za novac koji pada, čak i ako odrasli s penijima baci ogroman broj novčića, nijedno pojedinačno dijete neće ih prikupiti ni blizu 85, koliko mu je potrebno da plati čuvaru. Isto vrijedi i za odrasle koji nose novčiće od pet centi, deset centi i dvadeset pet centi. Iako svi oni bace zapanjujuće velik iznos novca, svako dijete može biti sretno ako uhvati makar jedan novčić (većina ih ne dobije ništa), a zasigurno nijedno dijete ne može prikupiti 85 centi potrebnih za izlazninu. Ali tada, kad odrasli s dolarima počne bacati svoje novčanice – čak i relativno male iznose, dolar po dolar – ona djeca koja sretno uhvate jednu novčanicu moći će odmah otići. Međutim, uočite da, iako se broj djece koja odlaze znatno povećava kako onaj odrasli s dolarima postaje sve velikodušniji, sva

ona imaju po 15 centi nakon što plate čuvaru. To vrijedi bez obzira na ukupan broj dobačenih dolara.

Evo kakve sve to ima veze s fotoelektričnim efektom. Na temelju gore izloženih podataka dobivenih eksperimentima, Einstein je predložio da se u novi opis svjetlosti uvede Planckova grudasta slika valne energije. Prema Einsteinu, zraku svjetlosti bi zapravo trebalo smatrati strujom sićušnih paketića – sićušnih čestica svjetlosti – koje je kemičar Gilbert Lewis na kraju nazvao *fotonima* (a mi smo tu ideju iskoristili u svom primjeru sa svjetlosnim satom u poglavlju 2). Da bismo dobili dojam o razmjerima, prema tom, čestičnom viđenju svjetlosti, tipična žarulja od 100W emitira oko stotinu milijardi milijardi (10^{20}) fotona u sekundi. Einstein se poslužio tom novom koncepcijom kako bi predložio mikroskopski mehanizam u osnovi fotoelektričnog efekta: elektron bude izbačen iz metalne površine, kako je protumačio Einstein, ako je pogođen fotonom koji nosi dovoljno energije. A što određuje energiju pojedinačnog fotona? Da

bi objasnio podatke dobivene eksperimentima, Einstein je slijedio Plancka i zaključio da je energija *svakog* fotona proporcionalna frekvenciji svjetlosnog vala (a faktor proporcionalnosti je Planckova konstanta).

A sada, poput dječje minimalne izlaznine, elektrone u metalu mora pobuditi foton koji posjeduje određenu minimalnu energiju da bi odletjeli s površine. (Kao i kod djece koja se bore za novac, krajnje je malo vjerojatno da će svaki elektron biti pogođen s više od jednog fotona – a većina uopće ne bude pogođena.) No ako je frekvencija dolazeće svjetlosti preniska, njezini pojedinačni fotoni neće imati dovoljno snage da izbace elektrone. Kao što nijedno dijete ne može platiti izlazninu bez obzira na velik ukupan broj novčića kojima ih odrasli zasipaju, nijedan elektron se ne oslobodi bez obzira na veliku ukupnu energiju sadržanu u dolazećoj svjetlosnoj zraci ako je njezina frekvencija (a time i energija njenih pojedinačnih fotona) preniska.

No isto kao što djeca mogu otići iz zgrade čim denominacija novčanica koje padaju na njih postane dovoljno velika, elektroni će biti izbačeni iz površine čim frekvencija svjetlosti koja ju je obasjala – njihova energijska denominacija – postane dovoljno visoka. Štoviše, isto kao što odrasla osoba s dolarima povećava ukupan iznos dobačenog novca povećavajući broj pojedinačnih dobačenih novčanica, tako se i ukupan intenzitet svjetlosne zrake povećava povećanjem broja fotona koje sadrži. I kao što više dolara znači da više djece može otići, tako i više fotona znači da je više elektrona pogođeno i izbačeno s površine. No, uočimo da preostala energija koju svaki od tih elektrona ima nakon što je pometen s površine ovisi samo o energiji fotona koji ga je pogodio – a nju određuje frekvencija svjetlosne zrake, a ne njen ukupni intenzitet. Kao što djeca izlaze iz podruma s 15 centi bez obzira na to koliko je mnogo dolarskih novčanica bačeno, svaki elektron odlazi s površine s istom energijom – te stoga i s istom brzinom – bez obzira na ukupan intenzitet dolazeće svjetlosti. Veći ukupan

iznos novca znači jednostavno da više djece može otići; veći ukupan iznos energije u svjetlosnoj zraci jednostavno znači da je oslobođeno više elektrona. Ako želimo da djeca odu iz podruma s više novca, moramo povećati denominaciju novčanica koje im dobacujemo; ako želimo da elektroni zbrišu s površine većom brzinom, moramo povećati frekvenciju dolazeće svjetlosti – to jest, moramo povećati energijsku denominaciju fotona kojima obasjavamo metalnu površinu.

To je u savršenom skladu s podacima koje se dobiva eksperimentima. Frekvencija svjetlosti (njezina boja) određuje brzinu izbačenih elektrona; ukupan intenzitet svjetlosti određuje njihov broj. I tako je Einstein dokazao da Planckova pretpostavka o grudastoj energiji doista odražava temeljno svojstvo elektromagnetskih valova: oni se sastoje od čestica – fotona – koji su male grudice svjetlosti, ili *kvanti*. Energija sadržana u tim valovima grudasta je zato što se sastoji od grudica.

Einsteinova spoznaja značila je velik napredak. No, kao što ćemo vidjeti, ta priča nije tako nedvosmislena kao što se možda čini.

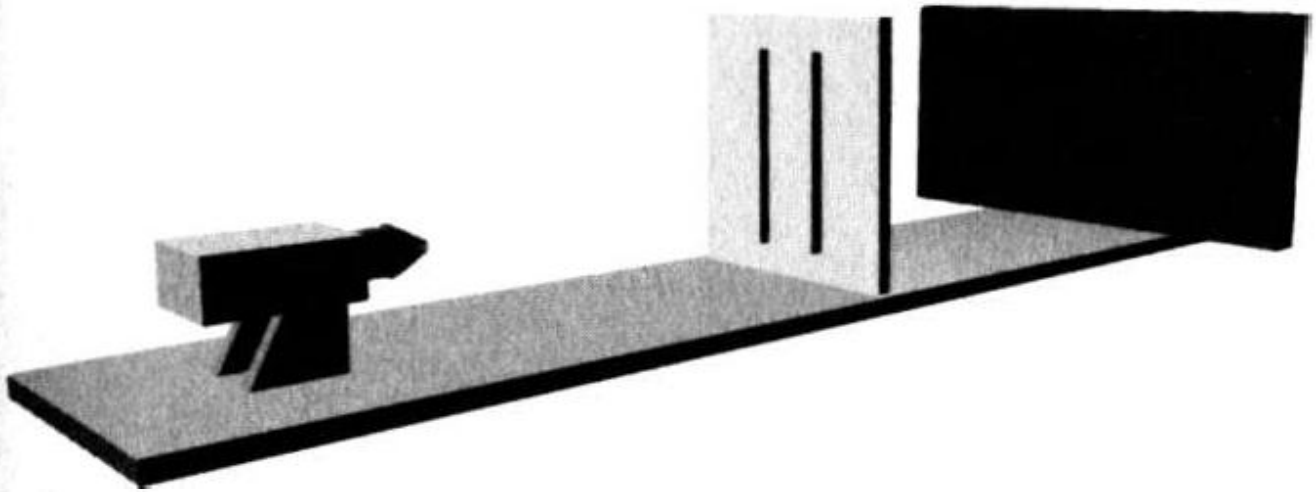
Je li to val ili je to čestica?

Svatko zna da se voda – pa time i vodeni valovi – sastoji od velikog broja molekula vode. Pa, je li onda iznenađujuće da se svjetlosni valovi također sastoje od velikog broja čestica, naime od fotona? Jest. Ali iznenađenje se krije u detaljima. Vidite, prije više od tristo godina Newton je proglasio da se svjetlost sastoji od struje čestica, pa ta pomisao baš i nije nova. Međutim, neki Newtonovi kolege, od kojih je najistaknutiji bio nizozemski fizičar Christian Huygens, nisu se složili s njim i tvrdili su da je svjetlost val. Rasprava je bjesnjela, ali eksperimenti koje je izveo engleski fizičar Thomas Young početkom devetnaestog stoljeća pokazali su da

Newton nije imao pravo.

Jedna verzija Youngovog eksperimenta – poznatog kao eksperiment s dvjema pukotinama – shematski je ilustrirana na slici 4.3. Feynman je volio govoriti da se sva kvantna mehanika može izvesti samo iz tog eksperimenta, pa rasprava o njemu itekako ima smisla. Kao što vidimo na slici 4.3, svjetlost pada na tanku, čvrstu prepreku u kojoj su usječene dvije pukotine. Svjetlost koja prođe kroz pukotine zabilježi se na fotografskoj ploči: svjetlija područja na fotografiji znače više svjetla. Eksperiment se sastoji u uspoređivanju slika na fotografskoj ploči koje nastanu kad je otvorena jedna pukotina ili pak obje pukotine dok na prepreku pada svjetlost.

Ako je lijeva pukotina prekrivena, a desni ostavljena otvorenom, fotografija izgleda poput one prikazane na slici 4.4. To ima smisla jer svjetlost koja udari u fotografsku ploču mora proći kroz jedinu otvorenu pukotinu i stoga će biti koncentrirana na desnoj strani fotografije. Slično tome,

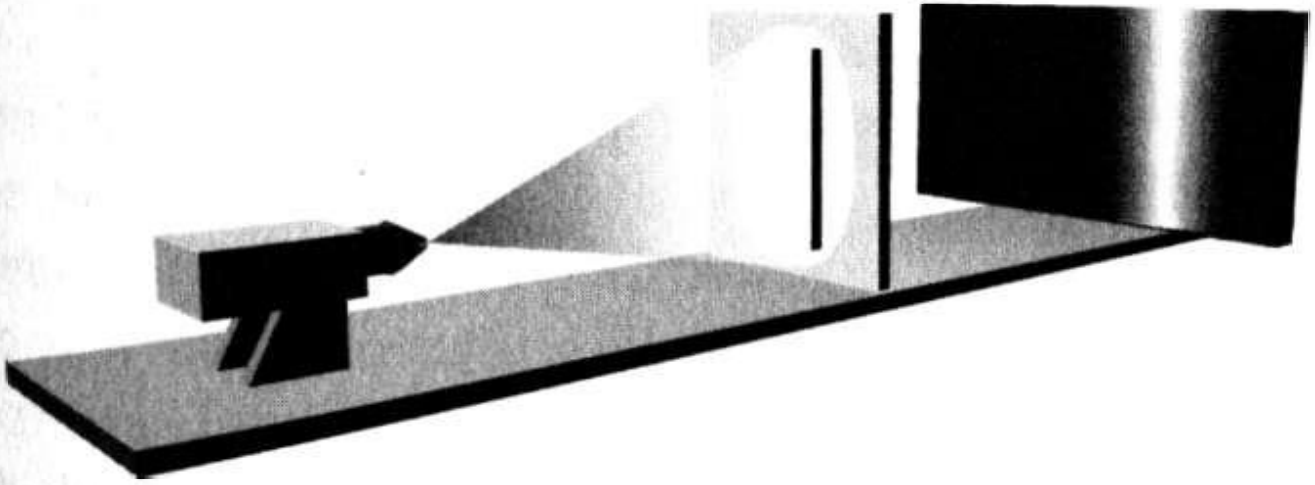


Slika 4.3 U eksperimentu s dvjema pukotinama svjetlosna zraka pada na prepreku u kojoj su urezana dvije pukotine. Svjetlost koja prođe kroz prepreku tada se bilježi na fotografskoj ploči, kada su otvorene obje pukotine ili pak samo jedna.

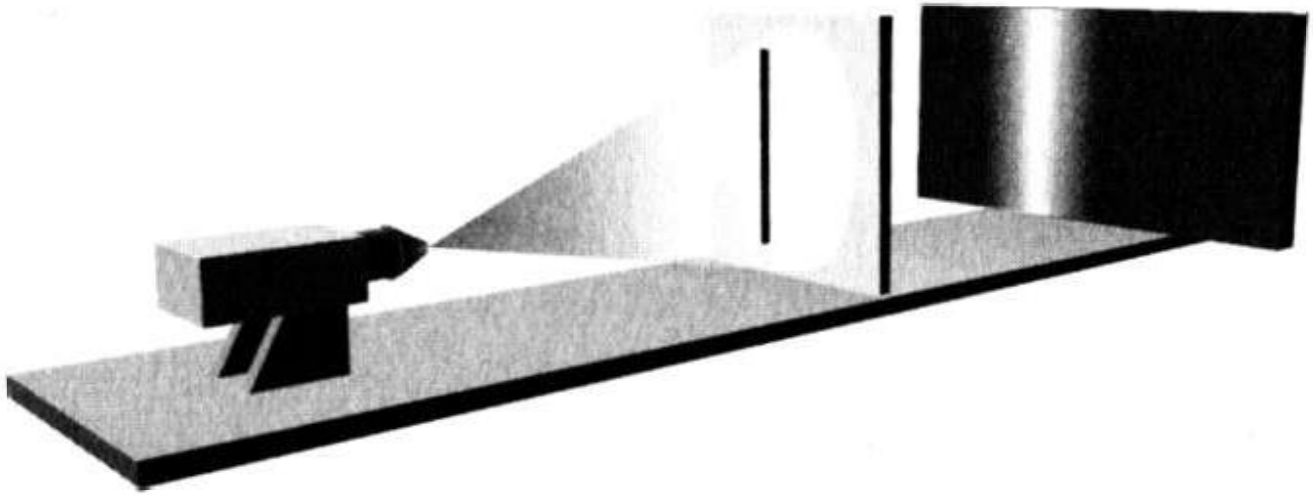
ako se prekrije desna pukotina, a lijeva ostavi otvorenom, fotografija će izgledati poput one na slici 4.5. Ako su *obje* pukotine otvorene, Newtonova čestična teorija svjetlosti predviđa da će fotografska ploča izgledati poput one na slici 4.6, koja je zbroj slika 4.4 i 4.5. U biti, ako Newtonove čestice shvatite kao da su kuglice koje bacate na zid, one koje prođu kroza ni bit će koncentrirane na dva područja, poravnata s

kroza nj bit će koncentrirane na dva područja, poravnata s dvjema pukotinama. Suprotno tome, valna teorija svjetlosti daje posve drukčije predviđanje onoga što se događa kada su obje pukotine otvorene. Pogledajmo.

Zamislimo na trenutak da se umjesto svjetlosnih bavimo valovima na vodi. Doći ćemo do istog rezultata, ali o vodi je lakše razmišljati. Kad vodeni valovi udare u prepreku, iz obje pukotine pojave se kružni izlazni valovi, poput onih



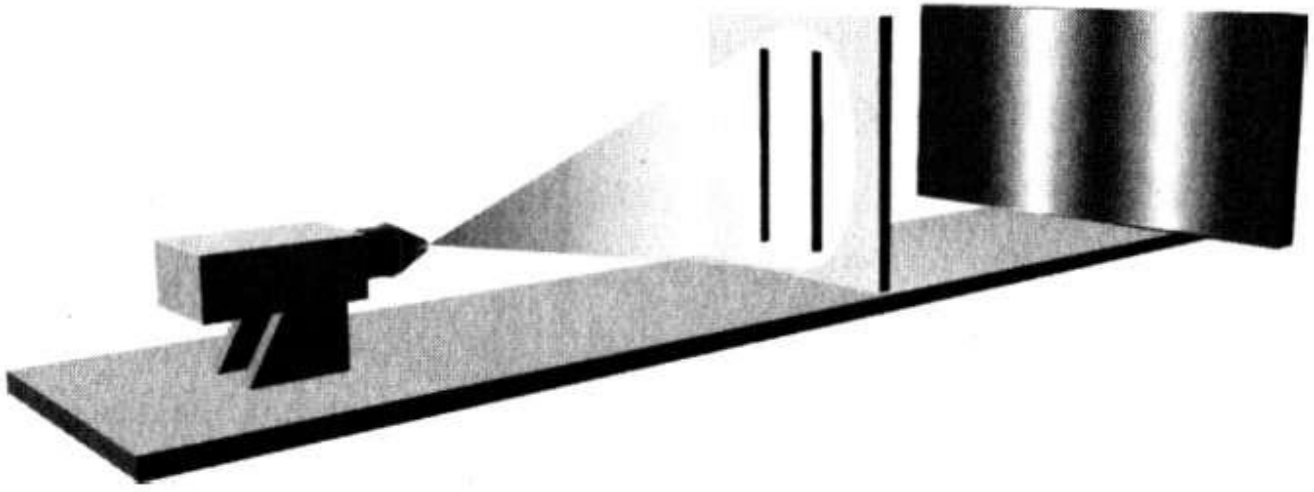
Slika 4.4 Desna pukotina je u ovom eksperimentu otvorena i stvara prikazanu sliku na fotografskoj ploči.



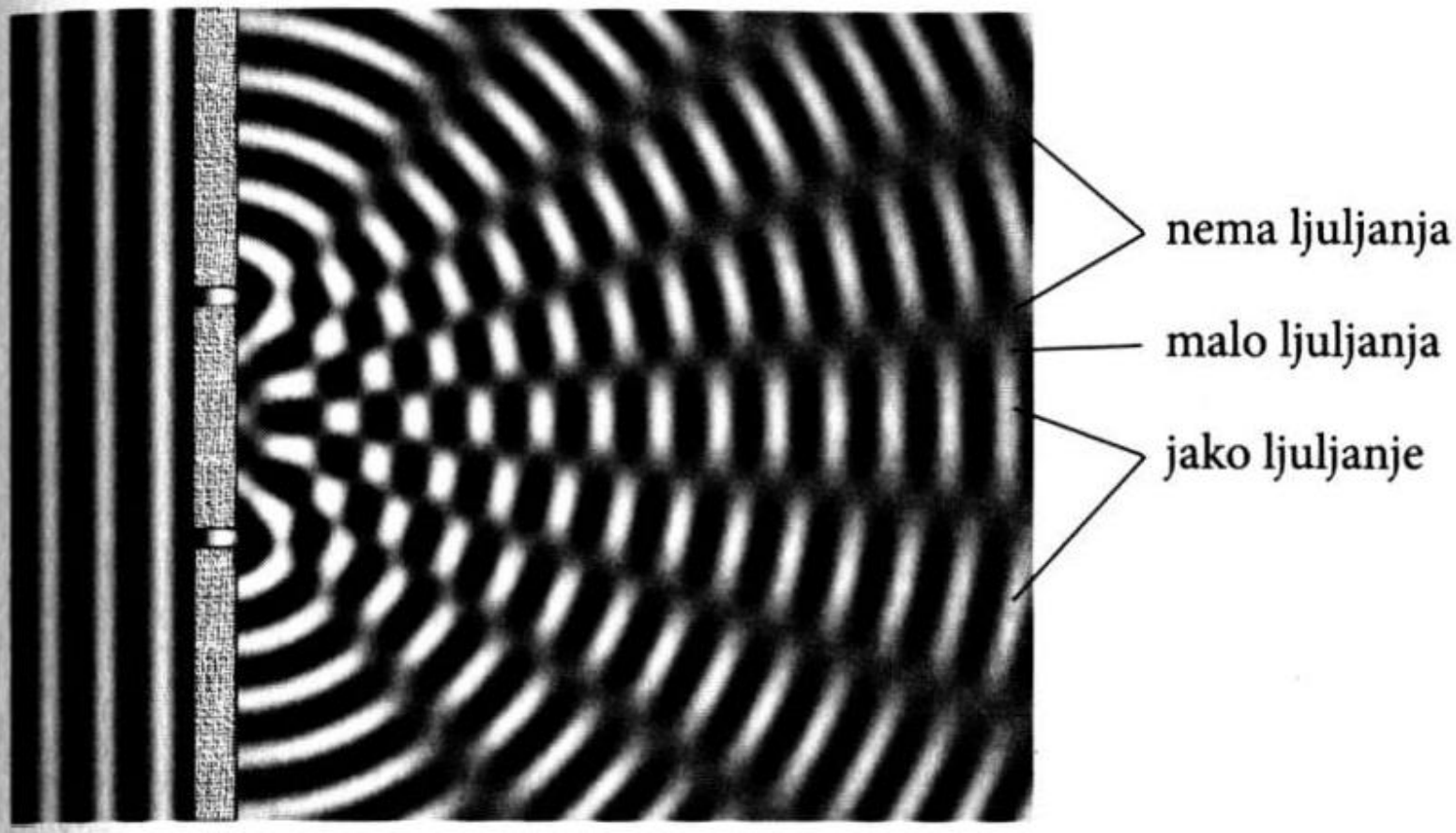
Slika 4.5 Kao slika 4.4, osim što je otvorena lijeva pukotina.

nastalih bacanjem kamenčića u jezerce, što je ilustrirano na slici 4.7. (To je lako pokušati s preprekom od šperploče s dva proreza u lavoru s vodom.) Budući da se valovi koji izlaze iz pukotina presijecaju, događa se nešto zanimljivo: ako se presijecaju vrhovi valova, visina vala na presjecištu je veća: ona je zbroj visina dvaju pojedinačnih valova. Ako se presijecaju dolovi valova, dubina udubine vode na to mjestu

povećа se na sličan način. I na kraju, ako se vrh vala koji dolazi iz jedne pukotine presijeca s dolom vala koji dolazi iz druge, oni se *poništavaju*. (Zapravo, to je princip rada onih šminkerskih slušalica za eliminaciju buke – one mjere oblik dolazećeg zvučnog vala i tada proizvode drugi, čiji je oblik upravo "suprotan", čime se poništava neželjena buka.) Između tih ekstremnih presijecanja – vrhova s vrhovima,



Slika 4.6 Newtonovo čestično poimanje svjetlosti predviđa da će fotografska ploča će prikazivati zbroj slika 4.4 i 4.5 kad su otvorene obje pukotine.

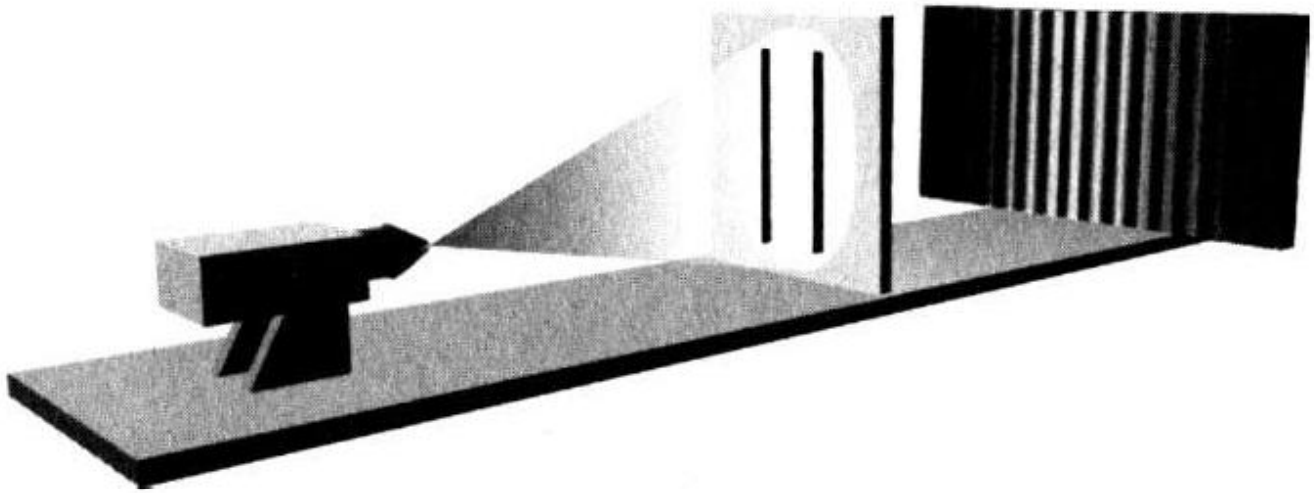


Slika 4.7 Kružni valovi na vodi koji izlaze iz dviju pukotina međusobno se preklapaju, zbog čega zbrojeni val može na nekim mjestima biti pojačan, a na drugim oslabljen.

dolova s dolovima i vrhova s dolovima – nalazi se obilje djelomičnih povećanja visine i djelomičnih poništavanja. Ako s ekipom suradnika formirate flotilu brodića paralelnih

s preprekom i ako svaki od vas objavi koliko jako se ljulja na tako nastalom valu kad on prođe, rezultat će izgledati donekle nalik na onaj prikazan na desnom kraju slike 4.7. Lokacije jačih ljuljanja su ondje gdje se poklope vrhovi (ili dolovi) valova iz obje pukotine. Područja minimalnoga ili nikakvoga ljuljanja su gdje se vrhovi vala iz jedne pukotine poklope s dolom vala iz druge pukotine, jer tako dolazi do poništavanja.

Budući da fotografska ploča bilježi koliko jako se "ljulja" zbog dolazeće svjetlosti, posve ista logika primijenjena na valno poimanje svjetlosne zrake govori nam da, kada su obje pukotine otvorene, fotografija će izgledati poput one na slici 4.8. Najsvjetlija područja na slici 4.8 su ondje gdje se poklapaju vrhovi (ili dolovi) svjetlosnih valova iz dviju pukotina. Tamna područja su ondje gdje se vrhovi valova iz jedne pukotine poklapaju s dolovima valova iz druge, što rezultira poništavanjem. Taj niz svijetlih i tamnih pruga po-



Slika 4.8 Ako je svjetlost val, onda će kad su obje pukotine otvorena, doći će do interferencije između dijelova valova koji dolaze iz različitih pukotina.

znat je kao *interferencijski uzorak*. Ta fotografija znatno je drukčija od one prikazane na slici 4.6 i stoga postoji konkretan eksperiment za razlikovanje čestičnog i valnog poimanja svjetlosti. Young je izveo jednu verziju tog eksperimenta i njegovi rezultati odgovarali su slici 4.8, čime su potvrdili valnu sliku. Newtonovo čestično poimanje bilo je poraženo (iako je trebalo proteći dosta vremena da to fizičari prihvate). Pobjedničku, valnu teoriju svjetlosti na kraju je na ma-

tematički čvrste temelje postavio Maxwell.

No čini se da je Einstein, čovjek koji je srušio Newtonovu cijenjenu teoriju gravitacije, sada svojim fotonima oživio Newtonov čestični model svjetlosti. Naravno, i dalje postavljamo isto pitanje: kako čestična perspektiva može objasniti interferenciju prikazanu na slici 4.8? Na prvi pogled, možda ćete se domisliti sljedećeg prijedloga rješenja: Voda se sastoji od molekula H_2O – "čestica" vode. No ipak, kad mnogo tih molekula struji jedna uz drugu, one mogu stvarati valove na vodi, uz prateće interferencijske uzorke, poput onog ilustriranog na slici 4.7. I tako, možda se čini razumnim pretpostaviti da valna svojstva, kao što je interferencija, mogu nastati iz čestične slike svjetlosti pod uvjetom da je riječ o velikom broju fotona, čestica svjetlosti.

No u stvarnosti je mikroskopski svijet mnogo istančaniji. Na primjer, ako se intenzitet izvora svjetlosti na slici 4.8 sve više smanjuje, čak i do razine na kojoj se na prepreku emi-

tiraju *pojedinačni* fotoni, jedan po jedan – recimo, po jedan svakih deset sekundi – fotografska ploča u tom eksperimentu ipak će izgledati kao na slici 4.8: sve dok čekamo dovoljno dugo da velik broj tih pojedinačnih grudica svjetlosti dođe do pukotine, i da svaka od njih bude zabilježena kao jedna točka kad udari u fotografsku ploču, te točke će se rasporediti tako da čine sliku interferencije, poput uzorka na slici 4.8. To nas zaprepašćuje. Kako *pojedinačni* fotoni koji jedan po jedan prolaze kroz prepreku i pojedinačno pogađaju fotografsku ploču mogu surađivati tako da stvaraju svijetle i tamne pruge valova u interferenciji? Uobičajena logika kaže nam da svaki foton prođe ili kroz lijevu ili kroz desnu pukotinu, pa bismo stoga očekivali vidjeti uzorak kao na slici 4.6. Ali ne vidimo ga.

Ako se niste duboko poklonili pred tom činjenicom u prirodi, to znači ili da ste je već prije vidjeli i već ste oguglali na sva čuda prirode, ili naš opis nije bio dovoljno živopisan. Dakle, ako je riječ o drugom slučaju, pokušajmo ponudi-

ti drugi opis, ponešto drukčiji. Zatvorimo lijevu pukotinu i emitiramo fotone jedan po jedan prema prepreci. Neki od njih prođu kroz pukotinu, a drugi ne prođu. Oni koji prođu stvore sliku na fotografskoj ploči, točku po točku, koja izgleda kao na slici 4.4. Tada ponovno izvedemo eksperiment s novom fotografskom pločom, ali ovaj put otvorite obje pukotine. Naravno, pomislili ste da ćete tako samo povećati broj fotona koji prolaze kroz pukotine u prepreci i pogađaju fotografsku ploču te tako izložiti film većoj količini svjetlosti nego u prvom eksperimentu. No kad pregledate tako nastalu sliku, vidjet ćete da ne samo da su mjesta na fotografskoj ploči koja su bila tamna u prvom eksperimentu sada svijetla, kao što smo i očekivali, nego postoje i mjesta na fotografskoj ploči koja su u prvom eksperimentu bila svijetla, a sada su tamna, kao na slici 4.8. *Povećavajući* broj pojedinačnih fotona koji pogađaju fotografsku ploču *smanjili* ste svjetlinu na nekim mjestima. Nekako, premda su

privremeno odvojeni, pojedinačni fotoni se uspijevaju međusobno poništiti. Pomislite koliko je to ludo: fotoni koji bi prošli kroz desnu pukotinu i pogodili film na jednoj od tamnih pruga na slici 4.8 ne uspijevaju to učiniti kad je *lijeva* pukotina otvorena (i zato je pruga sada tamna). Ali kako je moguće da sićušna grudica svjetlosti koja prolazi kroz jednu pukotinu bude pod ikakvim utjecajem toga je li *druga* pukotina otvorena? Kao što je napomenuo Feynman, to je upravo tako neobično kao da ispaljujete metke iz strojnice na prepreku, i kad su obje pukotine otvorene, neovisni, pojedinačno ispaljivani meci nekako se uspijevaju poništiti i ostavljaju uzorak netaknutih mjesta na meti – mjesta koja *jesu* pogođena kad je otvorena samo jedna pukotina.

Takvi eksperimenti pokazuju da se Einsteinove čestice svjetlosti prilično razlikuju od Newtonovih. Fotoni – iako su čestice – nekako posjeduju i valna svojstva svjetlosti. Činjenica da energiju tih čestica određuje valno svojstvo – fre-

frekvencija – prva je naznaka da se događa nešto čudno. No, cijelu priču dovršavaju fotoelektrični efekt i eksperiment s dvjema pukotinama. Fotoelektrični efekt dokazuje da svjetlost ima svojstva čestica. Eksperiment s dvjema pukotinama dokazuje da svjetlost manifestira interferencijska svojstva valova. Uzeti zajedno, oni dokazuju da svjetlost ima *i valna i čestična svojstva*. Mikroskopski svijet zahtijeva da odbacimo intuiciju da je nešto ili val ili čestica i prihvatimo mogućnost da je *i jedno i drugo*. Sada se prisjećamo Feynmanove izjave da "nitko ne razumije kvantnu mehaniku". Možemo izgovoriti riječi "valno-čestična dvojnost". Te riječi možemo prevesti u matematički formalizam koji zapanjujuće precizno opisuje eksperimente iz stvarnoga svijeta. No, na dubokoj, intuitivnoj razini izuzetno je teško razumjeti to začudno svojstvo mikroskopskoga svijeta.

U prvim desetljećima dvadesetog stoljeća mnogi od najvećih teorijskih fizičara neumorno su se trudili razviti matematički utemeljeno i fizikalno razumno razumijevanje tih dotad skrivenih svojstava stvarnosti. Na primjer, pod vodstvom Nielsa Bohra u Kopenhagenu načinjen je važan napredak u objašnjavanju svojstava svjetlosti koju emitiraju užareni atomi vodika. Ali, ta i druga istraživanja prije sredine 1920-ih prije su bila prisilno spajanje ideja iz devetnaestog stoljeća s novopronađenim kvantnim pojmovima nego koherentan okvir za razumijevanje fizikalnog univerzuma. U usporedbi s jasnim, logičnim okvirom Newtonovih zakona gibanja ili Maxwellovom elektromagnetskom teorijom, djelomično razvijena kvantna teorija bila je u pravom kaosu.

Mladi francuski plemić Louis de Broglie dodao je 1923. godine nov element kvantnoj gužvi, koji će ubrzo dovesti do matematičkog okvira moderne kvantne mehanike i pri-

skrbiti mu Nobelovu nagradu za fiziku 1929. Nadahnut logičkim nizom utemeljenim na Einsteinovoj specijalnoj teoriji relativnosti, de Broglie je predložio da se valno-čestična dvojnost ne primijeni samo na svjetlost, nego i na materiju. Jednostavno rečeno, razmišljao je ovako: ako Einsteinova jednadžba $E=mc^2$ povezuje masu i energiju, i ako su Planck i Einstein povezali energiju s frekvencijom valova, onda, ako kombiniramo to dvoje, i masa bi trebala imati valno utjelovljenje. Nakon što je pomno proradio tu logiku, predložio je da, kao što je svjetlost valna pojava o kojoj kvantna teorija dokazuje da ima jednako valjan čestični opis, i elektron – koji obično smatramo česticom – bi mogao imati jednako valjan valni opis. Einstein je odmah prihvatio de Brogliejevu ideju jer se ona prirodno nadovezala na njegove vlastite priloge relativnosti i fotonima. No ipak, ništa ne može zamijeniti dokaz dobiven eksperimentom. Taj dokaz ubrzo su ponudili Clinton Davisson i Lester Germer.

Sredinom 1920-ih su Davisson i Germer, eksperimentalni fizičari u telefonskoj tvrtci Bell, proučavali kako se zraka elektrona odbija od komada nikla. Jedino što nam je ovdje važno jest to što se komadi nikla u tom eksperimentu u velikoj mjeri ponašaju poput dvije pukotine u eksperimentu koji smo ilustrirali crtežima u prethodnom odjeljku – zapravo, imamo pravo smatrati da je taj eksperiment jednak onome koji smo ovdje ilustrirali, osim što umjesto zrake svjetlosti imamo zraku elektrona. Prihvatit ćemo to gledište. Kad su Davisson i Germer proučili elektrone koji prolaze kroz dvije pukotine u prepreci tako što su postavili fosforescentni ekran koji je svijetlom točkom bilježio lokaciju udara svakog elektrona – to se zapravo događa i u televizijskom prijemniku s katodnom cijevi – otkrili su nešto posebno. Pojavio se uzorak sličan onome na slici 4.8. Dakle, njihov eksperiment je dokazao da elektroni pokazuju interferencijske pojave, što odaje *valove*. Na tamnim točkama na fosforescentnom ekranu elektroni su se nekako "međusobno

poništavali" upravo poput vrhova i dolova valova na vodi koji se preklapaju. Čak i kad je zraka ispaljenih elektrona bila "stanjena" tako da je, na primjer, svakih deset sekundi emitiran samo jedan elektron, pojedinačni elektroni i dalje su tvorili svijetle i tamne pruge – točku po točku. Kao i fotoni, pojedinačni elektroni međusobno "interferiraju" tako da pojedinačni elektroni s vremenom načine uzorak interferencije koji povezujemo s valovima. Prisiljeni smo zaključiti da svaki elektron posjeduje valni karakter, uz dobro nam poznat opis elektrona kao čestice.

Premda smo to opisali u slučaju elektrona, slični eksperimenti vode do zaključka da *sva* materija ima valna obilježja. Ali, kako se to slaže s našim svakodnevnim iskustvom materije kao čvrste i otporne, nimalo valičaste? Pa, de Broglie je postavio formulu za valnu duljinu materijalnih valova, i pokazuje se da je valna duljina proporcionalna Planckovoj konstanti $\hbar$. (Preciznije rečeno, valna duljina je $\hbar$ podijeljena

s količinom gibanja, zaletom materijalnog tijela.) Budući da je $\hbar$ tako malena, rezultirajući valovi su isto tako maleni u usporedbi sa svakodnevnim razmjerima. Zato valna obilježja materije postaju izravno očita tek pomnim mikroskopskim istraživanjem. Kao što velika vrijednost brzine svjetlosti c prikriva velik dio prave prirode prostora i vremena, tako i malena vrijednost $\hbar$ prikriva valne aspekte materije u svakodnevnom svijetu.

Valovi čega?

Pojavom interferencije koju su otkrili Davisson i Germer valna priroda elektrona postala je neporecivo očitom. Ali, čega su to valovi? Jedan od prvih prijedloga odgovora iznio je austrijski fizičar Erwin Schrödinger. On je pretpostavio da su valovi "razmazani" elektroni. Tako je izrazio dio "dojma" o elektronskom valu, ali taj izraz bio je pregrub. Kad

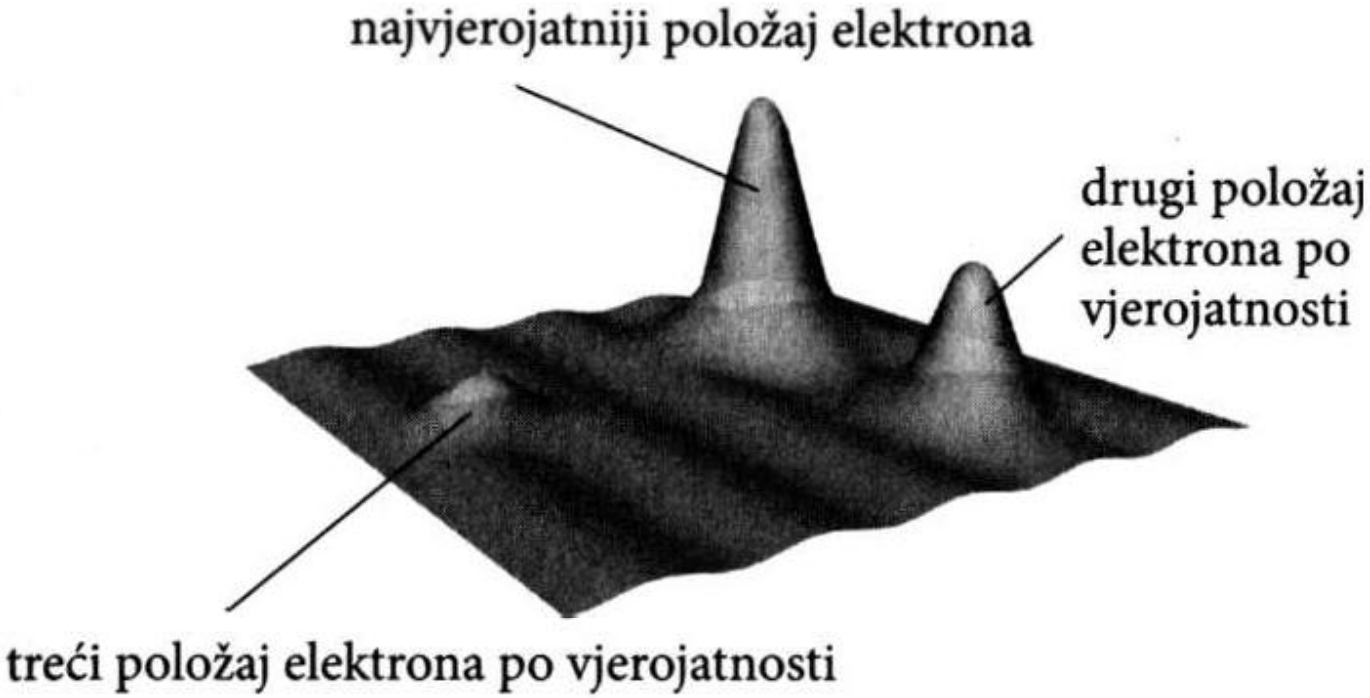
nešto razmažete, dio toga je ovdje, a dio ondje. No, nikad ne nalazimo pola elektrona, trećinu elektrona niti ikakav njegov dio. Zato je teško shvatiti što bi razmazani elektron zapravo bio. Kao alternativu, njemački fizičar Max Born vještо je doradio Schrödingerovu interpretaciju elektronskog vala, i njegova interpretacija – koju su pojačali Bohr i njegovi kolege – vrijedi još i danas. Bornov prijedlog jedno je od najčudnijih obilježja kvantne teorije, ali potkrepljuje ga ogroman broj podataka dobivenih eksperimentima. On je ustvrdio da se elektronski val mora protumačiti sa stajališta *vjerojatnosti*. Na mjestima gdje je iznos (preciznije rečeno, kvadrat iznosa) vala *velik, vjerojatnije* je da će se naći elektron; na mjestima gdje je iznos *malen, manje je vjerojatno* da će se naći elektron. Primjer toga ilustriran je na slici 4.9.

To je doista neobična ideja. Kako vjerojatnost može imati mjesta u formulaciji fundamentalne fizike? Navikli smo na to da se vjerojatnost pojavljuje u konjskim utrkama, u ba-

canju novčića i za stolom za rulet, ali u tim slučajevima ona je samo odraz našeg *nepotpunog* znanja. Kad bismo znali precizno brzinu kotača ruleta, težinu i čvrstoću bijele kuglice, lokaciju i brzinu kuglice kad padne na kotač, egzaktne specifikacije materijala od kojeg se sastoje utori i tako dalje, i kad bismo svoje proračune izveli na dovoljno moćnim kompjutorima, tada bismo, prema klasičnoj fizici, mogli sa sigurnošću predvidjeti gdje će se kuglica smjestiti. Kockarnice se oslanjaju na to da vi nećete uspjeti prikupiti sve te informacije niti izvesti potrebne proračune prije nego što uložite novac. No, vidimo da vjerojatnost kakvu nalazimo za ruletom stolom ne odražava ništa temeljno o tome kako svijet funkcionira. Suprotno tome, kvantna mehanika uvodi pojam vjerojatnosti u univerzum na mnogo dubljoj razini. Prema Bornu i prema više od pola stoljeća eksperimenata nakon njega, valna priroda svjetlosti znači da se sama materija mora opisati na bitno probabilistički način. Za makroskopske predmete poput šalice kave i kotača ruleta, de

Brogliejevo pravilo kaže da je valni karakter praktički neprimjetan i za većinu uobičajenih svrha se kvantnomehanička vjerojatnost može u potpunosti zanemariti. Ali na mikroskopskoj razini doznajemo da najbolje što možemo učiniti jest reći da elektron ima određenu vjerojatnost da se nađe na danom položaju.

Probabilistička interpretacija ima sljedeću prednost: ako elektronski val čini isto što i drugi valovi – na primjer, udari u prepreku i stvori svakojaka osobita mreškanja – to ne znači da se sam elektron raspao na dijelove. Umjesto toga, to znači da sada postoji određen broj lokacija na kojima bi se elektron *mogao* naći s nezanemarivom vjerojatnošću. To u praksi znači da, ako se određeni eksperiment s elektronom ponavlja na apsolutno identičan način, *neće* se uvijek iznova dobiti isti rezultat, na primjer za izmjereni položaj elektrona. Umjesto toga, ponavljanje eksperimenta dat će obilje raznolikih rezultata, a koliko puta će se elektron naći



Slika 4.9 Val povezan s elektronom najveći je ondje gdje je najvjerojatnije da će se elektron naći, a progresivno je manji na lokacijama gdje je manje vjerojatno da će se naći.

na nekom danom položaju ovisit će o obliku vala vjerojatnosti elektrona. Ako je val vjerojatnosti (preciznije rečeno, kvadrat vala vjerojatnosti) dvostruko veći na lokaciji A nego na lokaciji B, onda teorija predviđa da će se u nizu od

mnogo ponavljanja eksperimenta elektron naći na lokaciji A dvostruko češće nego na lokaciji B. Egzaktne ishode eksperimenata nije moguće predvidjeti; najbolje što možemo učiniti jest predvidjeti vjerojatnost da bi se neki dani ishod *mogao* dogoditi.

No ipak, sve dok možemo matematički odrediti precizan oblik valova vjerojatnosti, njihova probabilistička predviđanja *mogu* se provjeriti ponavljanjem danog eksperimenta mnogo puta, čime se eksperimentom mjeri vjerojatnost da će se dobiti ovaj ili onaj konkretni rezultat. Samo nekoliko mjeseci nakon de Brogliejevog prijedloga Schrödinger je načinio odlučan korak prema tom cilju napisavši jednadžbu koja određuje oblik i razvoj valova vjerojatnosti, ili, kako ih se na kraju nazvalo, *valnih funkcija*. Nije dugo trebalo da Schrödingerova jednadžba i probabilistička interpretacija počnu davati čudesno precizna predviđanja. Dakle, 1927. izgubljena je klasična nevinost. Nestali su dani univerzuma kao satnog mehanizma čiji su sastavni dijelovi bili pokrenu-

ti u nekom trenutku u prošlosti i poslušno ispunjavaju svoju neizbježnu, jedinstveno određenu sudbinu. Prema kvantnoj mehanici, univerzum se razvija u skladu sa strogim i preciznim matematičkim formalizmom, ali taj okvir određuje samo vjerojatnost da će se dogoditi neka određena budućnost – a ne koja konkretna budućnost će se doista dogoditi.

Taj zaključak uznemiruje mnoge, a neki ga smatraju apsolutno neprihvatljivim. Među njima je bio i Einstein. U jednoj od najcitiranijih izjava u povijesti fizike, Einstein je prekorio kvantne tvrdoglavce: "Bog se ne kocka". Smatrao je da se vjerojatnost pojavila u fundamentalnoj fizici zbog tek malo istančanijeg razloga od onog iz kojeg se pojavila na kotaču ruleta: bitne nepotpunosti u našem razumijevanju. Prema Einsteinovu gledištu, u univerzumu nema mjesta za budućnost čiji precizan oblik uključuje element slučaja. Fizika bi trebala predvidjeti kako se univerzum razvija, a ne samo vjerojatnost da bi do nekog konkretnog razvoja moglo

doći. No, eksperiment za eksperimentom – a neki od najuvjerljivijih izvedeni su nakon njegove smrti – uvjerljivo potvrđuju da Einstein nije imao pravo. Kao što je o tome rekao britanski teorijski fizičar Stephen Hawking: "Einstein je bio zbunjen, a ne kvantna teorija."[5]

No ipak, rasprava o tome što kvantna mehanika doista znači nastavlja se nesmanjenom žestinom. Svi se slažu o tome kako se služiti jednadžbama kvantne teorije za davanje preciznih predviđanja. Ali, nema konsenzusa o tome što doista znači imati valove vjerojatnosti, niti o tome kako čestica "odabire" koju od svojih mnogih budućnosti će slijediti, pa čak ni o tome odabire li ona išta ili se razgrana kako bi proživjela sve moguće budućnosti u sve široj areni paralelnih svemira. Ta pitanja interpretacije zaslužuju raspravu koja bi zauzela cijelu ovu knjigu, a zapravo i postoji mnogo dobrih knjiga koje izlažu ovaj ili onaj način razmišljanja o kvantnoj

---

5 Stephen Hawking, predavanje na Amsterdamskom simpoziju o gravitaciji, crnim rupama i teoriji struna, 21. lipnja 1997.

teoriji. No sigurno je jedno: kako god tumačite kvantnu mehaniku, ona neporecivo pokazuje da se univerzum temelji na načelima koja su, sa stajališta naše svakodnevice, vrlo bizarna.

Zajednička lekcija i teorije relativnosti i kvantne mehanike glasi da, kad se doista udubimo u osnovni mehanizam univerzuma, možemo naići na aspekte koji se itekako razlikuju od naših očekivanja. Ako smo dovoljno hrabri da postavimo duboka pitanja, možda će nam za prihvaćanje odgovora biti potrebna neočekivana fleksibilnost.

Feynmanova perspektiva

Richard Feynman bio je jedan od najvećih teorijskih fizičara nakon Einsteina. U potpunosti je prihvaćao probabilističku jezgru kvantne mehanike, ali u godinama nakon 2. svjetskog rata ponudio je nov i plodan način promišljanja nove

teorije. S gledišta brojčanih predviđanja, Feynmanova perspektiva u potpunosti se slaže sa svim do čega se došlo prije njega. No, njegova formulacija znatno je drukčija. Opišimo je u kontekstu eksperimenta s dvjema pukotinama.

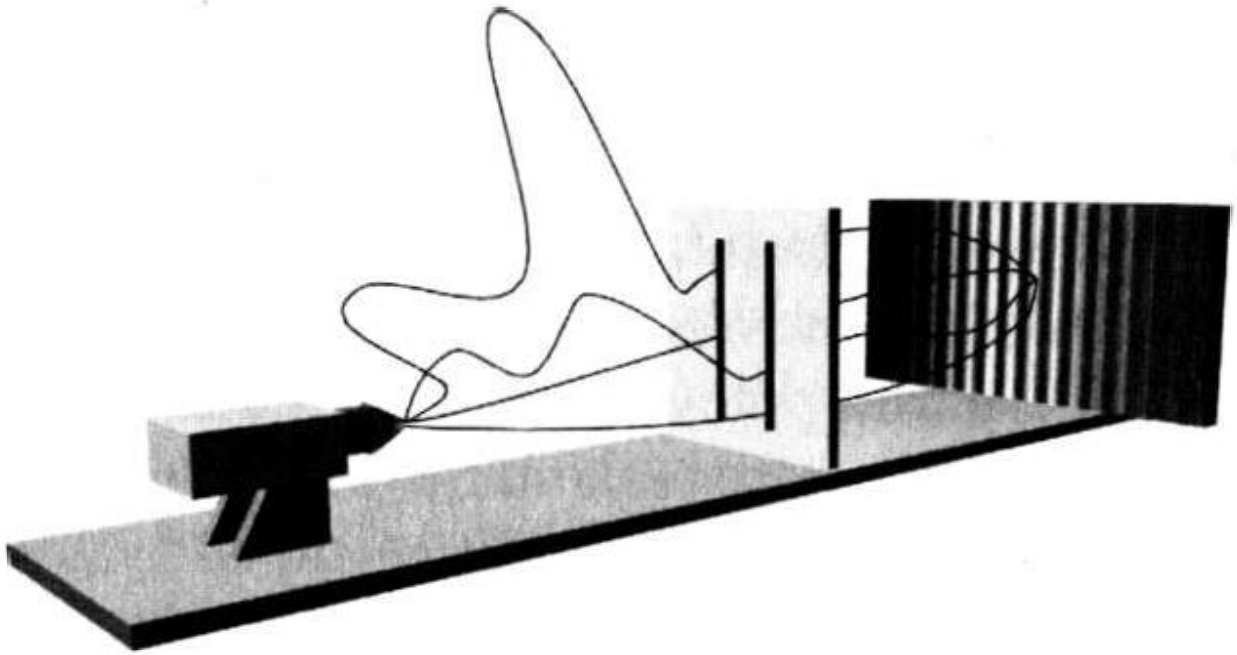
Na slici 4.8 problematično je to što svaki elektron zamišljamo kao da prolazi ili kroz lijevu pukotinu ili kroz desnu pukotinu te stoga očekujemo da zbroj slika 4.4 i 4.5, kao na slici 4.6, točno prikaže rezultirajuće podatke. Elektron koji prolazi kroz desnu pukotinu ne bi smio razmišljati o tome postoji li i lijeva, i obratno. Ali, on nekako ipak kao da razmišlja o tome. Uzorak interferencije koji tako nastaje zahtijeva preklapanje i miješanje *nečega* što je osjetljivo na obje pukotine čak i kad ispaljujemo elektrone jedan po jedan. Schrödinger, de Broglie i Born objasnili su tu pojavu povezujući val vjerojatnosti sa svakim elektronom. Poput valova na vodi na slici 4.7, val vjerojatnosti elektrona "vidi" obje pukotine i podložan je istoj vrsti interferencije koja nastaje

miješanjem valova. Mjesta na kojima je val vjerojatnosti pojačan miješanjem, poput mjesta jačeg ljuljanja na slici 4.7, jesu lokacije na kojima je vjerojatno da će se naći elektron; mjesta na kojima je val vjerojatnosti miješanjem smanjen, poput mjesta minimalnog ili nikakvog ljuljanja na slici 4.7, jesu lokacije gdje je malo ili nimalo vjerojatno da će se elektron naći. Elektroni udaraju u fosforescentni ekran jedan po jedan, raspoređuju se u skladu s tim profilom vjerojatnosti i tako grade interferencijski uzorak poput onoga na slici 4.8.

Feynman je sagledao stvari iz drugog kuta. Doveo je u pitanje klasičnu pretpostavku da svaki elektron prolazi ili kroz lijevi ili kroz desnu pukotinu. Možda mislite da je to tako samorazumljivo svojstvo svijeta da je krajnje glupo dovoditi ga u pitanje. Napokon, zar ne možete *pogledati* u područje između pukotina i na fosforescentni ekran kako biste odredili kroz koju pukotinu prolazi koji elektron? Možete. Ali time ste *promijenili* eksperiment. Da biste vidjeli elektron, morate mu nešto učiniti – na primjer, možete ga osvijetliti,

to jest, odbiti fotone od njega. E, sada, u svakodnevici fotoni djeluju kao zanemarive, malene sonde koje se odbijaju od drveća, slika i ljudi a da pritom u biti ne utječu na stanje gibanja tih razmjerno velikih materijalnih tijela. No, elektroni su maleni pramenovi materije. Koliko god nježno izvedete svoje određivanje kroz koju pukotinu je elektron prošao, fotoni koji se odbiju od elektrona nužno će utjecati na njegovo daljnje gibanje. A ta promjena gibanja mijenja i rezultate našeg eksperimenta. Ako poremetite eksperiment samo toliko da odredite kroz koji je pukotinu elektron prošao, svi eksperimenti pokazuju da se rezultati mijenjaju u odnosu na onaj na slici 4.8 i postaju nalik na onaj na slici 4.6! U kvantnom svijetu sigurno je sljedeće: kad se uspostavi da je svaki elektron prošao ili kroz lijevu ili kroz desnu pukotinu, interferencija između dvije pukotine nestaje.

Feynman je objavio da svaki elektron koji prođe i udari u fosforescentni ekran zapravo prolazi kroz *obje* pukoti-



Slika 4.10. Prema Feynmanovoj formulaciji kvantne mehanike, čestice treba vidjeti kao da putuju od jedne do druge lokacije svim mogućim putanjama. Ovdje je prikazano nekoliko od beskonačno mnogo putanja jednog elektrona koji putuje od izvora do fosforescentnog ekrana. Uočimo da ovaj elektron zapravo prolazi kroz obje pukotine.

ne. Zvuči luđački, ali to nije sve: stvari postaju sve čudnije. Feynman je ustvrdio da na putu od izvora do dane točke na fosforescentnom ekranu svaki pojedinačni elektron zapravo

prolazi *svim mogućim putanjama istodobno*; neke od tih putanja ilustrirane su na slici 4.10. Lijepo i uredno prolazi kroz lijevu pukotinu. Istovremeno lijepo i uredno prolazi kroz desnu pukotinu. Ide prema lijevoj pukotini, ali iznenada promijeni smjer i uputi se prema desnoj. Vrluda naprijed-natrag i na kraju prođe kroz desnu pukotinu. Polazi na dugo putovanje do galaksije Andromeda, vrati se i prođe kroz lijevu pukotinu na putu prema ekranu. I tako to ide – prema Feynmanu, elektron istovremeno "onjuši" *svaku* moguću putanju koja povezuje njegovu početnu lokaciju s konačnim odredištem.

Feynman je pokazao da može pripisati broj svakoj od tih putanja tako da njihov kombinirani prosjek daje posve isti rezultat izračunate vjerojatnosti kao i kad se za to služimo valnom funkcijom. I tako, iz Feynmanove perspektive nije potrebno s elektronom povezivati nikakav val vjerojatnosti. Umjesto toga, trebamo zamisliti nešto jednako tako bizarno, ako ne i više. Vjerojatnost da elektron – a uvijek ga se

gleda kao česticu – dođe na koju odabranu točku na ekranu nastaje iz kombiniranog učinka svih mogućih načina da se onamo dospije. To je poznato kao Feynmanov pristup "zbroja svih putanja" kvantnoj mehanici.[6]

Sada se vaše klasično obrazovanje već žestoko buni: kako može jedan elektron putovati različitim putovima *istovremeno* – i to ne manje nego beskonačno mnogo njih? Na prvi pogled se čini da je to utemeljen prigovor, ali kvantna mehanika – fizika našega svijeta – zahtijeva da tako prizemne prigovore zadržite za sebe. Rezultati proračuna na temelju Feynmanova pristupa slažu se s onima dobivenim metodom valne funkcije, koji se slažu s eksperimentima. Morate dopustiti prirodi da određuje što je razumno, a što nije. Kako je jednom napisao Feynman: "[Kvantna mehanika] opisuje prirodu kao apsurdnu s gledišta zdravoga razuma. I, u potpunosti se slaže s eksperimentima. Zato se nadam da možete prihvatiti prirodu kakva jest – apsurdnu."[7]

No, koliko god priroda bila apsurdna kad je istražuje-

mo na mikroskopskim razinama, stvari se moraju posebno posložiti tako da opet dobijemo dojam poznatih nam, prozaičnih događanja kakva doživljavamo u razmjerima svakodnevice. U tom cilju, Feynman je pokazao da, ako proučavate gibanje velikih predmeta – poput bejzbolskih lopti, aviona ili planeta, koji su veliki u usporedbi sa subatomskim česticama – njegovo pravilo pripisivanja broja svakoj putanji osigurava da se *sve putanje osim jedne poništavaju* kad se kombiniraju njihovi prilozi. Zapravo, što se tiče gibanja predmeta, važna je samo jedna od beskonačno mnogo putanja. A ta putanja je upravo ona koju daju Newtonovi za-

---

6 Vrijedi napomenuti da Feynmanov pristup kvantnoj mehanici može poslužiti da se izvede pristup utemeljen na valnim funkcijama i obratno; dakle, ta dva pristupa su posve ravnopravna. No ipak, pojmovi, jezik i interpretacije koje svaki pristup ističe prilično su različiti, iako daju apsolutno identične odgovore.

7 Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton: Princeton University Press, 1988).

koni gibanja. Zato nam se u svakodnevnom svijetu *čini* da predmeti – poput lopte bačene u zrak – slijede jednu, jedinstvenu i predvidljivu putanju od polazišta do odredišta. No za mikroskopske predmete, Feynmanovo pravilo pripisivanja brojeva putanjama pokazuje da mnoge različite putanje mogu pridonositi gibanju predmeta, a često to i čine. Na primjer, u eksperimentu s dvjema pukotinama, neke od tih putanja prolaze kroz različite pukotine, što daje uočeni interferencijski uzorak. U mikroskopskom području stoga ne možemo tvrditi da elektron prolazi kroz samo jednu ili drugu pukotinu. Interferencijski uzorak i Feynmanova alternativna formulacija kvantne mehanike zdušno svjedoče o suprotnom.

Kao što možemo zaključiti da različite interpretacije neke knjige ili filma mogu biti manje ili više korisne za razumijevanje raznih aspekata djela, isto vrijedi i za različite pristupe kvantnoj mehanici. Premda se njihova predviđanja uvijek savršeno poklapaju, pristup valne funkcije i Feyn-

manov pristup zbroja putanja pružaju nam različite načine promišljanja onoga što se događa. Kao što ćemo vidjeti, za neke primjene jedan ili drugi pristup može ponuditi neprocjenjiv okvir za objašnjavanje.

Kvantna čudnovatost

Dosad ste već stekli određen dojam o dramatično novom načinu na koji univerzum djeluje, prema kvantnoj mehanici. Ako još niste podlegli Bohrovoj vrtoglavici, od kvantne čudnovatosti o kojoj sada raspravljamo trebali biste barem malo zateturati.

Kvantnu mehaniku teže je intuitivno prihvatiti čak i od teorija relativnosti – zamisliti minijaturnu osobu rođenu i odraslu u mikroskopskom području. No postoji jedan aspekt teorije koji može biti putokaz za intuiciju, jer je to la-

kmus-svojstvo, po kojem se ona bitno razlikuje od klasične logike. To je načelo neodređenosti, koje je otkrio njemački fizičar Werner Heisenberg 1927. godine.

To načelo potječe od primjedbe koje ste se možda i sami dosjetili. Naveli smo da čin određivanja kroz koju pukotinu prolazi koji elektron (tj. određivanja njegovog položaja) nužno remeti njegovo daljnje gibanje (njegovu brzinu). No isto kao što se možemo uvjeriti u nečiju prisutnost ili tako da ga blago potapšemo ili da ga revno pljesnemo po leđima, zašto ne bismo mogli odrediti položaj elektrona "sve nježnijim" svjetlosnim izvorom kako bismo sve manje utjecali na njegovo gibanje? Sa stajališta fizike devetnaestog stoljeća, mogli bismo. Služeći se sve tamnijom svjetiljkom (i sve osjetljivijim detektorom svjetlosti), možemo sve manje utjecati na njegovo gibanje, na kraju gotovo ništa. Ali, sama kvantna mehanika otkriva manu u toj logici. Kako smanjujemo intenzitet izvora svjetlosti, znamo da se smanjuje broj fotona koje emitira. Kad dođemo do razine emitiranja po-

jedinačnih fotona, više ne možemo isključivati svjetlost a da je zapravo ne ugasimo. Postoji temeljna kvantnomehanička granica "blagosti" naše sonde. Dakle, uvijek postoji minimalna poremetnja brzine elektrona koju prouzročimo svojim mjerenjem njegova položaja.

Pa, to gotovo da je posve točno. Planckov zakon kaže nam da je energija jednoga fotona proporcionalna njegovoj frekvenciji (obratno proporcionalna njegovoj valnoj duljini). Služeći se svjetlom sve niže frekvencije (sve veće valne duljine) stoga možemo stvarati sve nježnije pojedinačne fotone. Ali, evo i kvake. Kad odbijemo val od nekog predmeta, informacija koju dobijemo dovoljna je samo da odredi položaj predmeta u okviru *greške jednake valnoj duljini vala.* Da bismo stekli intuitivni dojam o toj važnoj činjenici, zamislimo da pokušavamo točno odrediti lokaciju velike stijene tik ispod površine vode prema načinu na koji ona utječe na oceanske valove u prolazu. Kako se valovi približavaju stije-

ni, oni tvore uredan niz vrhova i dolova, jedan za drugim. Nakon prolaska uz stijenu, pojedinačni valni ciklusi su izobličeni, što je jasan znak prisutnosti podvodne stijene. No poput najsitnijeg niza oznaka na ravnalu, pojedinačni ciklusi vrhova i dolova su najsitnije jedinice koje čine niz valova, te stoga ako istražujemo samo koliko su oni izobličeni, možemo odrediti lokaciju stijene samo u okviru greške koja je jednaka duljini valnih ciklusa, to jest, valnoj duljini. U slučaju svjetlosti, fotoni koji je čine su, pojednostavljeno govoreći, pojedinačni valni ciklusi (pri čemu visinu valova određuje broj fotona); dakle, foton može poslužiti da odredi lokaciju predmeta samo s preciznošću od jedne valne duljine.

I tako smo suočeni s kvantnomehaničkim balansiranjem. Ako se poslužimo visokofrekventnom svjetlošću (kratke valne duljine), elektron možemo preciznije locirati. Ako se pak poslužimo svjetlošću niske frekvencije (veće valne duljine), minimiziramo utjecaj na gibanje elektrona, jer fotoni koji je čine imaju relativno malenu energiju, ali žrtvujemo

preciznost u određivanju položaja elektrona. Heisenberg je kvantitativno izrazio to suparništvo i pronašao matematičku vezu između preciznosti s kojom mjerimo položaj elektrona i preciznosti s kojom mjerimo njegovu brzinu. Otkrio je – u skladu s našom raspravom – da je jedna obratno proporcionalna drugoj: veća preciznost u mjerenju položaja nužno znači veću nepreciznost u mjerenju brzine, i obratno. I, što je od najveće važnosti, iako smo svoju diskusiju povezali s jednim konkretnim sredstvom za određivanje položaja elektrona, Heisenberg je pokazao da je razmjena između preciznosti mjerenja položaja i brzine temeljna činjenica koja je istinita bez obzira na upotrijebljenu opremu i primijenjenu proceduru. Za razliku od okvira u kojima je radio Newton, pa čak i Einstein, u kojemu se gibanje čestice opisuje dajući njezinu lokaciju i brzinu, kvantna mehanika pokazuje da na mikroskopskoj razini *nikako ne možete znati oba ta svojstva s totalnom preciznošću*. Štoviše, što preciznije

znate jedno svojstvo, to manje precizno znate ono drugo. I premda smo to opisali za elektrone, iznesene ideje vrijede za sve sastojke prirode.

Einstein je pokušao što je više moguće umanjiti to odstupanje od klasične fizike tvrdeći da iako kvantna logika zasigurno ograničava naše *znanje* o položaju i brzini, elektron i dalje ima jasno određen položaj i brzinu, upravo kao što smo oduvijek i mislili. No, napredak teorije koji su proteklih nekoliko desetljeća predvodili pokojni irski fizičar John Bell, kao i rezultati eksperimenata Alana Aspecta i njegovih suradnika uvjerljivo su dokazali da Einstein nije imao pravo. Elektrone – a ni ništa drugo – ne može se opisati kao da su istovremeno na toj-i-toj lokaciji *i* da imaju tu-i-tu brzinu. Kvantna mehanika pokazuje da se takvu izjavu ne samo nikad ne bi moglo eksperimentima provjeriti – kao što smo gore objasnili – nego ona izravno proturječi drugim, u novije vrijeme utvrđenim rezultatima eksperimenata.

Zapravo, kad biste uhvatili jedan elektron u veliku, čvr-

stu kutiju i tada polako približavali njezine strane kako biste određivali njegov položaj sa sve većom preciznošću, vidjeli biste da elektron postaje sve nemirniji. Gotovo kao da ga je spopala klaustrofobija, elektron će polagano ludjeti – odbijat će se od zidova sve brže i sve nepredvidljivije. Priroda ne dopušta da se njezine sastojke stjera u kut. U *Precrtanom h*, gdje zamišljamo da je *ħ mnogo* veća nego u stvarnom svijetu te tako podvrgava svakodnevne predmete kvantnim efektima, ledene kocke u Georgeovom i Gracienom piću groznično zvekeću kao da pate od kvantne klaustrofobije. Iako je *Precrtano h* zemlja mašte – u stvarnosti *ħ* je užasno malena – upravo takva kvantna klaustrofobija prožima mikroskopski svijet. Gibanje mikroskopskih čestica postaje sve žustrije kada ih se proučava i ograničava na sve manja područja prostora.

Princip neodređenosti uzrokuje i neobičan efekt, poznat kao *kvantno tuneliranje*. Ako ispalite plastičnu kuglicu na tri

metra debeo betonski zid, klasična fizika potvrđuje ono što će vam reći i vaša intuicija: kuglica će se odbiti prema vama. Razlog je taj što kuglica naprosto nema dovoljno energije da probije tako jaku prepreku. No, na razini fundamentalnih čestica, kvantna mehanika nedvosmisleno pokazuje da valne funkcije – to jest, valovi vjerojatnosti – čestica koje tvore kuglicu imaju malen dio koji *procuri* kroz zid. To znači da postoje maleni – ali ne ništavni – izgledi da kuglica doista *uspije* proći kroz zid i pojaviti se na drugoj strani. Kako to može biti? Razlog se svodi, opet, na Heisenbergovo načelo neodređenosti.

Da bismo to ilustrirali, zamislite da ste bez prebijenog novčića i iznenada doznate da vam je daleki rođak umro u zemlji na drugom kraju svijeta i ostavio veliko bogatstvo. Jedini problem je u tome što nemate novca za avionsku kartu da doputujete onamo. Objašnjavate situaciju prijateljima: kad bi vam samo omogućili da savladate barijeru između sebe i svog novog bogatstva tako što bi vam privremeno dali

novac za kartu, a vi biste im to velikodušno nadoknadili kad se vratite. Ali, nitko nema novca da vam pozajmi. Međutim, sjetili ste se da vam stari prijatelj radi u aviokompaniji i obratite mu se s istim zahtjevom. Ni on nema novca za pozajmicu, ali nudi rješenje. Knjigovodstveni sustav aviokompanije je takav da ako pošaljete uplatu u roku od 24 sata nakon dolaska na odredište, nitko neće znati da niste platili prije polaska. Tako ćete moći otići po svoje nasljedstvo.

Knjigovodstveni postupci kvantne mehanike donekle su slični tome. Kao što je Heisenberg dokazao da postoji razmjena između preciznosti mjerenja položaja i brzine, dokazao je da postoji i slična razmjena između preciznosti mjerenja *energije* i koliko dugo to mjerenje traje. Kvantna mehanika tvrdi da ne možete reći da neka čestica ima upravo takvu-i-takvu energiju upravo u tom-i-tom trenutku. Sve veća preciznost mjerenja energije zahtijeva sve dulje vrijeme da se ta mjerenja obave. Pojednostavljeno govoreći,

to znači da energija koju čestica ima može živahno fluktuirati sve dok je ta fluktuacija dovoljno kratka. Dakle, kao što vam knjigovodstveni sustav aviokompanije omogućuje da "pozajmite" novac za avionsku kartu pod uvjetom da ga dovoljno brzo uplatite, tako kvantna mehanika omogućuje čestici da "pozajmi" energiju ako je može vratiti u roku koji određuje Heisenbergovo načelo neodređenosti.

Matematika kvantne mehanike pokazuje da što je veća energijska prepreka, to je niža vjerojatnost da će se to kreativno mikroskopsko knjigovodstvo doista uspostaviti. No što se tiče mikroskopskih čestica suočenih s konkretnom blokadom, one mogu, a katkad to i čine, pozajmiti dovoljno energije da učine ono što je nemoguće sa stajališta klasične fizike – trenutno prodrijeti i napraviti tunel kroz područje u koje na početku nisu imale dovoljno energije ući. Kako predmeti koje proučavamo postaju sve kompliciraniji, i sastoje se od sve više čestica, takvo kvantno tuneliranje i dalje se može dogoditi, ali to postaje sve manje vjerojatno jer *sve*

pojedine čestice moraju imati dovoljno sreće da protuneliraju kroz blokadu. Ali šokantne epizode s Georgeovom nestalom cigarom i s Georgeovim i Gracienim prolaženjem kroz zid bara, *mogu* se dogoditi. U zemlji fantazija kao što je *Precrtano h*, u kojoj zamišljamo da je $\hbar$ velika, takvo kvantno tuneliranje je uobičajeno. No, pravila vjerojatnosti kvantne mehanike – a posebice stvarna malena vrijednost $\hbar$ u stvarnome svijetu – pokazuju da, kad biste svake sekunde pokušavali proći kroz zid, morali biste čekati dulje od dosadašnje starosti svemira da biste imali dobre izglede da u jednom od pokušaja doista prođete kroz zid. No, uz vječnu strpljivost (i dugovječnost), uspjeli biste se – prije ili kasnije – pojaviti na drugoj strani.

Načelo neodređenosti srž je kvantne mehanike. Svojstva koja obično smatramo osnovnima i neupitnima – da predmeti imaju jasno određen položaj i brzinu, kao i jasno određenu energiju i količinu gibanja – sada se vide kao puki

artefakti činjenice da je Planckova konstanta tako malena u razmjerima svakodnevnoga svijeta. Od najveće je važnosti sljedeće: kad se ta kvantna spoznaja primijeni na tkivo prostorvremena, ona otkriva kobne nesavršenosti u "šavovima gravitacije" i vodi nas prema trećem i najvažnijem sukobu s kojim se fizika suočila u proteklom stoljeću.

PETO POGLAVLJE

Potreba za novom teorijom: opća relativnost protiv kvantne mehanike

Naše razumijevanje fizikalnog univerzuma u prošlom stoljeću znatno se produbilo. Teorijske alatke kvantne mehanike i opće teorije relativnosti omogućuju nam da razumijemo i dajemo provjerljiva predviđanja o fizikalnim događajima, od atomskog i subatomskog područja pa sve do fenomena

koji se pojavljuju u razmjerima galaksija, grozdova galaksija, i dalje, do strukture cijeloga univerzuma. To je monumentalno dostignuće. Doista nadahnjuje da su bića ograničena na jedan planet u orbiti oko sasvim obične zvijezde na samom rubu sasvim obične galaksije uspjela mišlju i eksperimentom dokučiti i razumjeti neke od najtajanstvenijih obilježja fizikalnog univerzuma. No ipak, fizičari po prirodi neće biti zadovoljni sve dok ne budu osjećali da su postigli najdublje, fundamentalno razumijevanje univerzuma. Na to je aludirao Stephen Hawking kao na prvi korak prema poznavanju "Božjeg uma".[1]

Obilje je dokaza da kvantna mehanika i opća teorija relativnosti ne pružaju tu, najdublju razinu razumijevanja. Budući da su im područja primjene tako različita, za veći-

---

[1] Stephen Hawking, *A Brief History of Time* (New York: Bantam Books, 1988), str. 175. *Usp. Kratka povijest vremena* (Zagreb: Izvori, 1996).

nu situacija potrebna je ili primjena kvantne mehanike ili opće teorije relativnosti, ali ne i jedne i druge. No, pod nekim ekstremnim okolnostima, kada su stvari vrlo masivne *i* vrlo malene – u blizini središnje točke crne rupe ili u cijelom univerzumu u trenutku velikog praska, da navedemo samo dva primjera – za pravo razumijevanje potrebna nam je i opća teorija relativnosti i kvantna mehanika. Međutim, poput smjese vatre i baruta, kad pokušamo kombinirati kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti, njihov spoj prouzroči katastrofu. Kad se jednadžbe dviju teorija pomiješaju, dobro formulirani fizikalni problemi daju besmislena rješenja. Taj besmisao često poprima oblik predviđanja da kvantnomehanička vjerojatnost za neki proces nije 20%, ni 73%, ni 91%, nego *beskonačno*. Što bi uopće mogla značiti vjerojatnost veća od jedan, a kamoli beskonačno velika vjerojatnost? Prisiljeni smo zaključiti da nešto ozbiljno nije u redu. Što nije u redu možemo odrediti detaljnim istraživanjem osnovnih svojstava opće teorije relativnosti i kvantne

mehanike.

Srž kvantne mehanike

Kad je Heisenberg otkrio načelo neodređenosti, fizika je načinila oštar zaokret i nikada se nije vratila na stari put. Vjerojatnosti, valne funkcije, interferencija i kvanti uključuju radikalno nove načine viđenja stvarnosti. No ipak, tvrdokorni "klasični" fizičar možda se i dalje drži za slamku nade da će se, kada se sve istraži, ta skretanja složit u mozaik koji se neće mnogo razlikovati od starih načina mišljenja. Ali načelo neodređenosti jasno i nedvojbeno potkopava svaki pokušaj prizivanja prošlosti.

Načelo neodređenosti govori nam da je univerzum grozničavo mjesto kada ga se istražuje na sve manjim udaljenostima i u sve kraćim vremenskim odsječcima. Vidjeli smo

neke dokaze toga u svom pokušaju, opisanom u prethodnom poglavlju, da se precizno odredi lokacija elementarnih čestica kao što su elektroni: obasjavajući elektrone svjetlošću sve više frekvencije, mjerimo njihov položaj sve preciznije, ali po određenoj cijeni, jer naša promatranja unose sve više poremećaja. Visokofrekventni fotoni imaju mnogo energije i stoga jako "udare" elektrone i značajno im promijene brzinu. Poput gužve u sobi punoj djece čije trenutačne položaje znate s velikom preciznošću, ali nad čijom brzinom i smjerom gibanja nemate nikakav nadzor, ta nesposobnost da znamo i položaj i brzinu i smjer gibanja elementarnih čestica znači da je mikroskopsko carstvo u svojoj biti iznimno burno.

Premda taj primjer izražava osnovni odnos između načela neodređenosti i gužve o kojoj govorimo, on zapravo otkriva samo dio priče. Može vas navesti da pomislite, na primjer, da neodređenost nastaje samo kad na pozornicu stupimo mi, nespretni promatrači prirode. To *nije* istina. Primjer elektrona koji silovito reagira kad ga se ograniči

na malenu kutiju tako što počne hitati okolo na sve strane ponešto nas približava istini. Čak i bez "izravnih pogodaka" eksperimentatorovih remetećih fotona, brzina i smjer elektrona naglo se i nepredvidljivo mijenjaju iz trenutka u trenutak. No čak ni taj primjer ne otkriva iznenađujuća mikroskopska svojstva koje implicira Heisenbergovo otkriće. Čak i u najmirnijem zamislivom području, kao što je prazan svemir, načelo neodređenosti kazuje nam da se s mikroskopskog gledišta odvija golema aktivnost. A ta aktivnost postaje sve grozničavija na sve manjim udaljenostima i u sve manjim vremenskim razmjerima.

Da bismo to razumjeli, potrebno nam je kvantno knjigovodstvo. U prethodnom poglavlju vidjeli smo da, kao što biste mogli privremeno pozajmiti novac kako biste svladali tešku financijsku prepreku, tako i čestica kao što je elektron može privremeno pozajmiti energiju kako bi svladala doslovnu, fizičku prepreku. To je istina. Ali kvantna mehanika

prisiljava nas da dalje razvijemo tu analogiju. Zamislimo osobu koja je kompulzivni pozajmljivač i ide od prijatelja do prijatelja i pozajmljuje novac. Što je kraće vrijeme na koje mu prijatelj može pozajmiti novac, to veću pozajmicu traži. Pozajmi i vrati, pozajmi i vrati – uvijek iznova, on nepokolebljivo uzima novac i ubrzo ga vraća. Poput podivljalih cijena dionica na burzi nekog burnog dana na Wall Streetu, količina novca koju kompulzivni pozajmljivač posjeduje u svakom danom trenutku prelazi iz krajnosti u krajnost, ali na kraju cijele priče, njegov knjigovođa kaže da nije nimalo imućniji nego kad je počeo.

Heisenbergovo načelo neodređenosti tvrdi da se slično, grozničavo premještanje energije i količine gibanja amotamo odvija neprekidno u univerzumu, na mikroskopskim udaljenostima i vremenskim razmacima. Čak i u području praznog svemira – na primjer, u praznoj kutiji – načelo neodređenosti kaže da su energija i količina gibanja neodređeni: titraju između krajnosti koje se povećavaju kako

smanjuje veličina kutije i interval u kojemu ih istražujemo. To je kao da je područje prostora unutar kutije kompulzivni "pozajmljivač" energije i momenta koji neprekidno dobiva "pozajmice" od univerzuma i potom ih "vraća". Ali, što sudjeluje u tim razmjenama, na primjer, u mirnom, *praznom* području svemira? Sve. Doslovno sve. Energija (i količina gibanja) je vrhovna konvertibilna deviza. $E = mc^2$ govori nam da se energija može pretvoriti u materiju i obratno. Dakle, ako je fluktuacija energije dovoljno velika, ona može trenutno prouzročiti da, na primjer, praskom nastanu elektron i njegov antimaterijalnih drug pozitron, čak i ako je to područje na početku bilo prazno! Budući da se ta energija mora brzo vratiti, te čestice će se gotovo trenutačno uništiti i osloboditi energiju koju su pozajmili pri stvaranju. Isto vrijedi i za sve druge oblike koju energija i moment mogu poprimiti – druge erupcije i uništavanje čestica, jake oscilacije elektromagnetskog polja, fluktuacije polja jake i sla-

be sile – kvantnomehanička neodređenost kazuje nam da je u mikroskopskim razmjerima univerzum uzavrela, kaotična, grozničava arena. Kao što se jednom našalio Feynman: "Stvaranje i uništavanje, stvaranje i uništavanje – kakav gubitak vremena."[2] Budući da se pozajmice i vraćanja u prosjeku poništavaju, prazno područje prostora doima se mirnim i dosadnim ako ga ne istražujemo mikroskopskom preciznošću. Međutim, načelo neodređenosti otkriva da makroskopsko uprosječivanje skriva obilje mikroskopske aktivnosti.[3] Kao što ćemo uskoro vidjeti, ta grozničavost je

---

2 Richard Feynman, citiran u: Timothy Ferris, *The Whole Shebang* (New York: Simon & Schuster, 1997), str. 97.

3 Ako vas još zbunjuje kako se išta može događati u posve praznom prostoru, važno je shvatiti da načelo neodređenosti ograničava koliko prostor zapravo može biti "prazan"; ono mijenja značenje praznog prostora. Na primjer, kada se primijeni na valne poremećaje u polju (kao što su elektromagnetski valovi koji se gibaju u elektromagnetskom polju), načelo neodređenosti pokazuje da su

amplituda vala i brzina kojom se ta amplituda mijenja podložne istom obratno proporcionalnom odnosu kao i položaj i brzina čestice: što se preciznije odredi amplituda, to manje možemo znati o brzini kojom se ta amplituda mijenja. Dakle, kad kažemo da je neko područje prostora prazno, obično mislimo, između ostaloga, da kroza nj ne prolaze valovi i da sva polja imaju nultu vrijednost. Rečeno nespretnim ali ipak korisnim jezikom, amplitude svih valova koji prolaze kroz to područje imaju upravo nultu vrijednost. No ako znamo preciznu vrijednost amplituda, načelo neodređenosti implicira da je tempo promjene amplituda posve neodređen i da u biti može poprimiti bilo koju vrijednost. No ako se amplitude mijenjaju, to znači da u sljedećem trenutku više *neće imati nultu vrijednost*, iako je to područje prostora i dalje "prazno". No ipak, *u prosjeku* će vrijednost polja *biti* nula jer će na nekim mjestima ta vrijednost biti pozitivna, a na drugima negativna; u prosjeku se ukupna energija u tom području ne mijenja. No, to je samo prosjek. Kvantna neodređenost znači da energija u polju – čak i u praznom području prostora – fluktuira, a fluktuacije se povećavaju kako se smanjuje udaljenost i vremenski razmjeri u kojima se to područje istražuje. Energija utjelovljena u tim trenutnim fluktuacijama polja može se, putem $E = mc^2$, pretvoriti u trenutno stvaranje parova če-

najveća prepreka spajanju opće teorije relativnosti i kvantne mehanike.

Kvantna teorija polja

Teorijski fizičari 1930-ih i 1940-ih godina, predvođeni likovima kao što su Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga i Feynman, da navedemo samo neke, neumorno su se trudili pronaći matematički formalizam koji bi se mogao nositi s mikroskopskom tvrdoglavošću. Zaključili su da je Schrödingerova jednadžba kvantnog vala (spomenuta u poglavlju 4) zapravo samo približan opis mikroskopske fizike – aproksimacija koja vrlo dobro funkcionira kad ne zalazimo preduboko u mikroskopsku vrevu (bilo eksperimentima ili teorijski), ali ako to učinimo, ona zakaže.

Glavno područje fizike koje je Schrödinger zanemario

u svojoj formulaciji kvantne mehanike je specijalna teorija relativnosti. Zapravo, Schrödinger jest na početku pokušao uključiti specijalnu relativnost, ali kvantna jednadžba do koje ga je to dovelo davala je predviđanja koja nisu bila u skladu s eksperimentalnim mjerenjima vodika. To je nadahnulo Schrödingera da prihvati vremenom prokušanu tradiciju u fizici: podijeli pa vladaj. Umjesto da pokušamo jednim skokom uključiti sve što znamo o fizikalnom univerzumu u razvoj nove teorije, često je korisnije načiniti mnogo malih koraka koji jedan po jedan uključuju najnovija otkrića avangardnih istraživanja. Schrödinger je tražio i našao matematički okvir koji je obuhvaćao eksperimentima otkrivenu dvojnost val-čestica, ali, na tom ranom stupnju razumijevanja, nije uključio specijalnu teoriju relativnosti.[4]

---

stica i njihovih antičestica, koje se vrlo brzo međusobno anihiliraju kako se energija u prosjeku ne bi mijenjala.

[4] Premda početna jednadžba koju je Schrödinger napisao – ona koja

No fizičari su ubrzo shvatili da je specijalna teorija relativnosti presudna za pravi kvantnomehanički okvir. To je zato što mikroskopska vreva zahtijeva da priznamo da se energija može manifestirati na mnogo raznolikih načina – to shvaćanje proizlazi iz objave specijalne teorije relativnosti $E = mc^2$. Zanemarivši specijalnu teoriju relativnosti, Schrödinger je u svom pristupu zanemario rastezljivost materije, energije i gibanja.

Fizičari su svoje početne, pionirske napore usmjerili na spajanje specijalne teorije relativnosti s kvantnim poimanjima elektromagnetske sile i njezinih interakcija s materijom. U nizu nadahnutih intelektualnih proboja stvorili su *kvantnu elektrodinamiku*. To je primjer onoga što se počelo nazivati *relativističkom kvantnom teorijom polja* ili ukratko, *kvantnom teorijom polja*. Kvantna je jer su sva pitanja vjerojatnosti i neodređenosti od početka uključena u nju; to je teorija polja jer spaja kvantna načela sa starim, klasičnim pojmom polja sile – u ovom slučaju, Maxwellovog elektromagnetskog polja. Na

kraju, relativistička je zato što je u nju od početka uključena specijalna teorija relativnosti. (Ako želite vizualnu metaforu kvantnog polja, zapravo možete prizvati sliku klasičnog polja – recimo, mora nevidljivih silnica koje prožimaju prostor – ali morali biste je modificirati na dva načina. Prvo, zamislite da se kvantno polje sastoji od odvojenih sastavnica, kao što su fotoni u elektromagnetskom polju. Drugo, trebali biste zamisliti kako se energija, u obliku masa čestica i njihova gibanja, neprekidno premješta iz jednog kvantnog polja u drugo kako ona bez prestanka titraju u prostoru i vremenu.)

Može se tvrditi da je kvantna elektrodinamika najpreciznija ikad predstavljena teorija prirodnih pojava. Ilustraciju

---

uključuje specijalnu relativnost – nije precizno opisivala kvantnomehanička svojstva elektrona u atomu vodika, ubrzo se shvatilo da je to vrijedna jednadžba u drugim kontekstima, i zapravo je još u upotrebi. Međutim, kad je Schrödinger objavio svoju jednadžbu, već su ga bili pretekli Oskar Klein i Walter Gordon, pa se njegova relativistička jednadžba naziva "Klein-Gordonovom jednadžbom".

te preciznosti možemo vidjeti u radu Toichira Kinoshite, fizičara čestica sa sveučilišta Cornell, koji se već trideset godina marljivo služi kvantnom elektrodinamikom kako bi precizno izračunao neka svojstva elektrona. Kinoshitini izračuni ispunjavaju tisuće stranica i na kraju su bili potrebni najjači kompjutori na svijetu da bi ih se dovršilo. Trud se isplatio. Izračuni daju predviđanja o elektronima koja su eksperimentima potvrđena do preciznosti od jedan prema milijardu. To je apsolutno zapanjujuće slaganje između apstraktnih, teorijskih izračuna i stvarnoga svijeta. Kvantnom elektrodinamikom fizičari su uspjeli utvrditi ulogu fotona kao "najmanjih mogućih paketića svjetlosti" i otkriti njihove interakcije s električno nabijenim česticama kao što su elektroni, u matematički dovršenom, prediktivnom i uvjerljivom okviru.

Uspjeh kvantne elektrodinamike nadahnuo je druge fizičare 1960-ih i 1970-ih da iskušaju analogni pristup u razvo-

koji 1960-ih i 1970-ih da iskušaju analogni pristup u razvoju kvantnomehaničkog razumijevanja slabe, jake i gravitacijske sile. U slučaju jake i slabe sile pokazalo se da je to vrlo plodan smjer istraživanja. Po analogiji s kvantnom elektrodinamikom, fizičari su uspjeli konstruirati kvantne teorije polja za jaku i slabu silu, nazvane kvantna kromodinamika i kvantna elektroslaba teorija. "Kvantna kromodinamika" je živopisniji naziv od logičnijeg "kvantna dinamika jake sile", ali to je samo naziv, bez dubljeg značenja; s druge strane, naziv "elektroslaba" doista označava važnu prijelomnicu u našem razumijevanju prirodnih sila.

Svojim radom za koji su dobili Nobelovu nagradu, Sheldon Glashow, Abdus Salam i Steven Weinberg dokazali su da su slaba i elektromagnetska sila prirodno *ujedinjene* svojim opisom u kvantnoj teoriji polja, iako se čini da su njihove manifestacije u svijetu oko nas posve različite. Uostalom, polja slabe sile imaju gotovo nezamjetnu snagu u svim razmjerima osim subatomskih, dok elektromagnetska polja – vidljiva svjetlost, radijski i televizijski signali, rend-

genske zrake – imaju neospornu makroskopsku prisutnost. No ipak, Glashow, Salam i Weinberg pokazali su u biti da se na dovoljno visokoj energiji i temperaturi – kakva je postojala tek djelić sekunde nakon velikog praska – polja elektromagnetske i slabe sile *rastaču* jedna u drugu, poprimaju značajke koje se ne može razlikovati i preciznije ih je nazivati *elektroslabim* poljima. Kad temperatura padne, kao što neprekidno i čini nakon velikog praska, elektromagnetska i slaba sila kristaliziraju se, drukčije od svog zajedničkog oblika na visokoj temperaturi – procesom poznatim kao *lomljenje simetrije*, koji ćemo kasnije opisati – i stoga se u univerzumu u kojem sada živimo čini da su različite.

I tako, ako pratite, 1970-ih godina fizičari su imali razuman i uspješan kvantnomehanički opis triju od četiriju sila (jake, slabe i elektromagnetske) i dokazali su da dvije od tri (slaba i elektromagnetska) zapravo imaju isto porijeklo (elektroslabu silu). Posljednjih dvadeset godina fizičari su podvrgnuli to kvantnomehaničko poimanje triju negravita-

cijskih sila – u njihovim interakcijama s materijalnim česticama, spomenutim u poglavlju 1 – nesmiljenim kušnjama u eksperimentima. Teorija je te kušnje podnijela s lakoćom. Kad eksperimentatori izmjere nekih 19 parametara (mase čestica u tablici 1, njihove naboje sila, navedene u tablici u bilješci 1 poglavlja 1, snagu triju negravitacijskih sila u tablici 2, kao i nekoliko drugih brojeva o kojima nećemo raspravljati), i kad teoretičari unesu te brojeve u kvantne teorije polja za materijalne čestice i za jaku, slabu i elektromagnetsku silu, dobivena predviđanja teorije o mikrokozmosu spektakularno se poklapaju s rezultatima eksperimenata. To vrijedi čak i za energiju koja može raznijeti materiju na komadiće veličine milijardinke milijardinke metra, što je današnja tehnološka granica. Zbog toga teoriju triju negravitacijskih sila i triju porodica materijalnih čestica fizičari zovu standardnom teorijom, ili (češće) *standardnim modelom* fizike čestica.

Posredničke čestice

Prema standardnom modelu, kao što je foton najmanja sastavnica elektromagnetskog polja, tako i polja jake i slabe sile imaju svoje najmanje sastavnice. Kao što smo ukratko izložili u poglavlju 1, najmanji paketići jake sile poznati su kao *gluoni*, a najmanji paketići slabe sile nazivaju se slabim baždarnim bozonima (ili, preciznije bozonima *W* i Z). Standardni model upućuje nas na poimanje da te čestice nemaju nikakvu unutarnju strukturu – u tom okviru one nisu ništa manje elementarne od čestica u trima materijalnim porodicama.

Fotoni, gluoni i slabi baždarni bozoni pružaju mikroskopski mehanizam za prijenos sila koje oni tvore. Na primjer, kad jedna električno nabijena čestica odbija drugu, istog električnog naboja, to možete shvatiti kao da su te čestice okružene električnim poljem – "oblakom" ili "maglom" "električne esencije" – a sila koju svaka čestica trpi potječe od odbijanja između njihovih polja sile. No, preciznije mi-

od odbijanja između njihovih polja sile. No, precizniji mikroskopski opis kako se one odbijaju ponešto je drukčiji. Elektromagnetsko polje sastoji se od roja fotona; interakcija između dvije nabijene čestice zapravo izvire iz toga što one "pucaju" fotone jedna u drugu. Donekle slično tome kako možete utjecati i na gibanje klizača po ledu i na svoje vlastito gibanje tako da na njega bacite niz kugli za kuglanje, tako i dvije električki nabijene čestice utječu jedna na drugu razmjenjujući te najmanje paketiće svjetlosti.

Važan nedostatak analogije s klizačem je u tome što je razmjena kugli za kuglanje uvijek "odbojna" – ona uvijek međusobno udaljava klizače. Za razliku od toga, dvije suprotno nabijene čestice također stupaju u interakcije, razmjenom fotona, ali elektromagnetska sila koja tako nastaje je privlačna. To je kao da foton zapravo nije prijenosnik same sile nego prenosi *poruku* o tome kako primatelj mora reagirati na silu o kojoj je riječ. Za jednako nabijene čestice foton prenosi poruku "odmakni se", a za čestice suprotnog

naboja prenosi poruku "približi se". Iz tog razloga o fotonu se katkad govori kao o posredničkoj čestici elektromagnetske sile. Slično tome, gluoni i slabi baždarni bozoni su posredničke čestice jake i slabe nuklearne sile. Jaka sila, koja drži kvarkove na okupu unutar protona i neutrona, nastaje tako što pojedinačni kvarkovi razmjenjuju gluone. Gluoni, da se tako izrazimo, pružaju "ljepilo" koje okuplja te subatomske čestice. Slaba sila, koja je odgovorna za neke vrste preobrazbi čestica uključenih u radioaktivni raspad, prenosi se slabim baždarnim bozonima.

Baždarna simetrija

Vjerojatno ste shvatili da je gravitacija uljez u našoj raspravi o kvantnoj teoriji prirodnih sila. S obzirom na uspjeh pristupa koji su fizičari primijenili s ostalim trima silama, možda predlažete da fizičari potraže kvantnu teoriju polja

gravitacijske sile – teorije u kojoj bi najmanji paketić polja gravitacijske sile, *graviton*, bio njezina posrednička čestica. Na prvi pogled se čini da bi taj prijedlog bio posebno prikladan jer kvantna teorija polja triju negravitacijskih sila otkriva da postoji izazovna sličnost između njih i aspekta gravitacijske sile koji smo susreli u poglavlju 3.

Prisjetimo se da nam gravitacijska sila omogućuje da izjavimo da su svi promatrači – bez obzira na svoje stanje gibanja – u potpunosti ravnopravni. Čak i oni o kojima bismo normalno mogli smatrati da ubrzavaju mogu tvrditi da miruju jer silu koju osjećaju mogu pripisati tome što su uronjeni u gravitacijsko polje. U tom smislu, gravitacija ostvaruje simetriju: ona osigurava jednaku valjanost svih mogućih točaka gledišta, svih mogućih referentnih okvira. Sličnost s jakom, slabom i elektromagnetskom silom u tome je što su sve povezane s ostvarivanjem simetrija, iako znatno apstraktnijih od simetrije povezane s gravitacijom.

Da bismo dobili grub dojam o tim istančanim principima simetrije, razmotrimo jedan važan primjer. Kao što smo zabilježili u tablici u bilješci 1 u poglavlju 1, svaki kvark može imati jednu od tri "boje" (koje se proizvoljno naziva crvenom, zelenom i plavom, premda su to samo oznake i nemaju nikakve veze s bojom u uobičajenom vizualnom smislu), koja određuje kako on reagira na jaku silu, na sličan način kao što električni naboj određuje kako reagira na elektromagnetsku silu. Svi prikupljeni podaci pokazuju da postoji simetrija između kvarkova u smislu da su sve interakcije između dvaju kvarkova istih boja (crvenog s crvenim, zelenog sa zelenim i plavog s plavim) identične, a interakcije između kvarkova različitih boja (crvenog sa zelenim, zelenog s plavim i plavog s crvenim) također su identične. Zapravo, podaci potkrepljuju nešto još dojmljivije. Ako se te tri boje – tri različita jaka naboja – koje kvark može nositi pomaknu na određeni način (grubo govoreći, u našem proizvoljnom kromatskom jeziku, ako se crvena, zelena i plava pomaknu,

na primjer, u žutu, indigo i ljubičastu), pa čak i ako se pojedinosti toj pomaka mijenjaju iz trenutka u trenutak ili od mjesta do mjesta, interakcije između kvarkova opet će ostati nepromijenjene. Iz tog razloga, kao što smo rekli da je kugla primjer rotacijske simetrije jer jednako izgleda bez obzira na to kako je rotiramo u rukama i kako mijenjamo kut pod kojim je gledamo, isto tako vidimo da je univerzum primjer *simetrije jake sile*. Te promjene naboja jake sile nimalo ne utječu na fiziku – ona je potpuno neosjetljiva na njih. Iz povijesnih razloga, fizičari kažu i da je simetrija jake sile primjer *baždarne simetrije*.[5]

---

[5] Za matematički obrazovana čitatelja napomenut ćemo da se načela simetrije koja se primjenjuju u fizici elementarnih čestica uglavnom zasnivaju na grupama, a ponajviše na Lieovim grupama. Elementarne čestice raspoređene su po reprezentacijama različitih grupa i jednadžbe koje vladaju njihovim razvojem u vremenu moraju poštovati pridružene simetrične transformacije. Za jaku silu ta se simetrija zove SU(3) (analogon običnih trodimenzionalnih

Evo što je bitno. Kao što simetrija između svih mogućih gledišta u općoj teoriji relativnosti zahtijeva postojanje gravitacijske sile, istraživanja koja su se oslanjala na rad Hermanna Weyla 1920-ih i Chen-Ning Yanga i Roberta Millsa 1950-ih pokazala su da baždarne simetrije zahtijevaju postojanje još nekih sila. Poput osjetljivog klimatizacijskog sustava koji održava temperaturu, tlak zraka i vlagu u stalnim granicama tako što savršeno kompenzira sve vanjske utjecaje, tako i neke vrste polja sila, prema Yangu i Millsu, savršeno kompenziraju pomake naboja sila te tako održavaju fizikalne interakcije između čestica u potpunosti nepromijenjenima. U slučaju baždarne simetrije povezane s pomacima u bojama kvarkova, sila koja je potrebna za to upravo je sama jaka sila. Naime, bez jake sile, gore spomenuti pomaci boja *promijenili* bi fiziku. Ta spoznaja pokazuje da, iako gravitacijska i jaka sila imaju vrlo različita svojstva (na primjer, prisjetimo se da je gravitacija daleko slabija od jake sile i da djeluje na neusporedivo većim udaljenostima),

one imaju donekle slično naslijeđe: obje su potrebne kako bi univerzum utjelovio određene simetrije. Štoviše, slična rasprava vrijedi i za slabu i elektromagnetsku silu, što dokazuje i da je njihovo postojanje vezano s još nekim baždarnim simetrijama – takozvanim slabim i elektromagnetskim baždarnim simetrijama. Dakle, sve četiri sile izravno su vezane s načelima simetrije.

Čini se da je to zajedničko svojstvo četiriju sila povoljan predznak za prijedlog koji smo iznijeli na početku ovog odjeljka. Naime, u svom trudu da uključimo kvantnu teo-

---

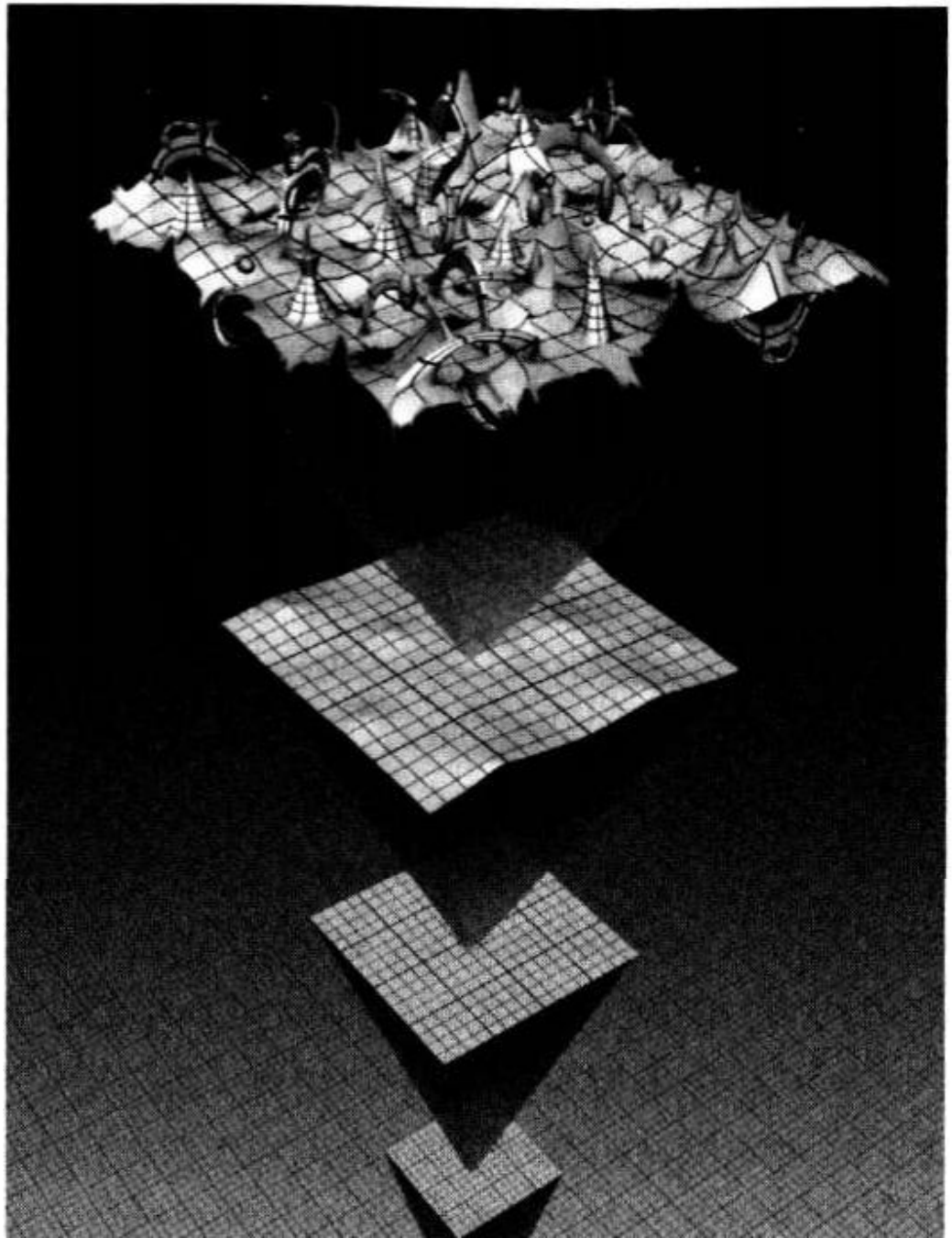
rotacija, ali u kompleksnom prostoru), a tri boje dane vrste kvarka transformiraju se u trodimenzionalnoj reprezentaciji. Pomak (s crvene, zelene i plave na žutu, indigo i ljubičastu) spomenut u tekstu je, preciznije rečeno, transformacija SU(3) koja djeluje na "koordinate boje" kvarka. Baždarna simetrija je ona u kojoj transformacije grupa mogu ovisiti o prostorvremenu: u ovom slučaju, riječ je o "rotaciji" boje kvarka na drukčiji način na drukčijim lokacijama u prostoru i trenucima u vremenu.

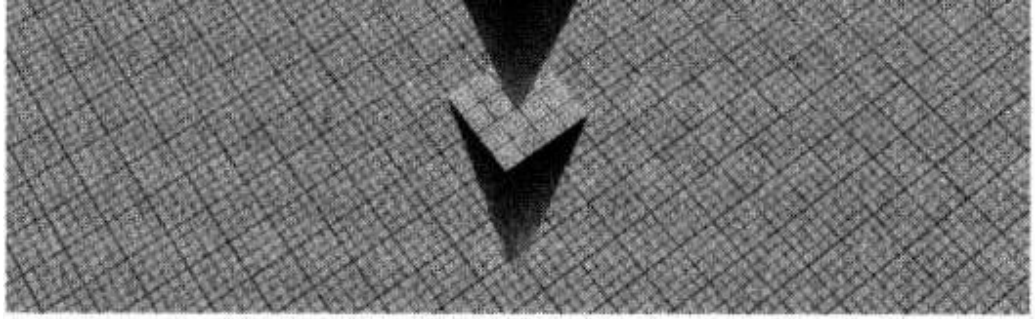
riju u opću teoriju relativnosti trebali bismo potražiti kvantnu teoriju polja gravitacijske sile, kao što su fizičari otkrili uspješne kvantne teorije polja ostalih triju sila. Ta logika već godinama nadahnjuje ambicioznu i istaknutu skupinu fizičara da uporno slijede taj put, ali pokazalo se da je teren pun opasnosti i nitko nije uspio proći njime u cjelini. Pogledajmo zašto.

Opća teorija relativnosti nasuprot kvantnoj mehanici

Uobičajeno područje primjene opće teorije relativnosti je područje golemih, astronomskih razmjera. Na takvim udaljenostima Einsteinova teorija implicira da manjak mase znači da je svemir ravan, kao što smo ilustrirali na slici 3.3. Želeći spojiti opću teoriju relativnosti s kvantnom mehanikom, sada moramo naglo promijeniti smjer i istražiti *mi-*

kroskopska svojstva prostora. To ilustriramo na slici 5.1 zumirajući i povećavajući sve manja područja tkiva prostora. Isprva, kako zumiramo ne događa se mnogo toga; kao što vidimo na prva tri stupnja povećanja na slici 5.1, struktura prostora zadržava u biti isti osnovni oblik. S klasičnoga gledišta, očekivali bismo da ta mirna i ravna slika prostora opstane sve do po volji malenih razmjera. No, kvantna mehanika radikalno mijenja taj zaključak. *Sve* je podvrgnuto kvantnim fluktuacijama koje su svojstvene načelu neodređenosti – čak i gravitacijsko polje. Iako klasična logika implicira da prazan prostor ima nulto gravitacijsko polje, kvantna mehanika pokazuje da ono u prosjeku i jest nulto, ali njegova stvarna vrijednost titra gore-dolje zbog kvantnih fluktuacija. Štoviše, načelo neodređenosti govori nam da veličina titraja gravitacijskog polja postaje sve veća kako se usmjeravamo prema sve manjim područjima prostora. Kvantna mehanika pokazuje da ništa ne trpi da ga se stjera





Slika 5.1 Sve više pojačavajući neko područje prostora, možemo istraživati njegova ultramikroskopska svojstva. Pokušaje spajanja opće teorije relativnosti i kvantne mehanike osujećuje uzavrela kvantna pjena koja se pojavljuje na najvišoj razini povećanja.

u kut; sužavanje prostornog fokusa vodi prema sve jačim titrajima.

Budući da je zakrivljenost odraz gravitacijskih polja, te kvantne fluktuacije manifestiraju se kao sve silovitija iskrivljenja okolnog prostora. Slutnje tih iskrivljenja vidimo na četvrtoj razini povećanja na slici 5.1. Istražujući sve manje razmjere prostora, kao što smo učinili na petoj razini slike 5.1, vidimo da slučajne kvantnomehaničke oscilacije gravitacijskog polja odgovaraju tako jakim uvijanjima prostora

da on više ne nalikuje blago zakrivljenom geometrijskom tijelu, kao u analogiji gumene opne kojom smo se poslužili u raspravi u poglavlju 3. Umjesto toga, prostor poprima pjenušav, turbulentan, iskrivljen oblik, ilustriran u gornjem dijelu slike. John Wheeler skovao je izraz *kvantna pjena* kako bi opisao vrenje koje otkriva takvo, mikroskopsko istraživanje prostora (i vremena) – on opisuje čudnovatu arenu univerzuma u kojoj uobičajeni pojmovi lijevo i desno, naprijed i natrag, gore i dolje (pa čak i prije i poslije) gube značenje. Na tako kratkim udaljenostima nailazimo na fundamentalnu neuskladivost opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. Pojam glatke prostorne geometrije, glavno načelo opće teorije relativnosti, ruši se na malim udaljenostima pod udarima silovitih fluktuacija kvantnoga svijeta. Na ultramikroskopskim razmjerima, glavno obilježje kvantne mehanike – načelo neodređenosti – u izravnom je sukobu s glavnim obilježjem opće teorije relativnosti – glatkim geometrijskim modelom prostora (i prostorvremena).

U praksi, taj sukob izražava se na itekako konkretan način. Proračuni koji spajaju jednadžbe opće teorije relativnosti i jednadžbe kvantne mehanike tipično daju jedno te isto, besmisleno rješenje: beskonačnost. Poput packe kakvu su nekoć davali učitelji, beskonačnost je prirodin način da nam kaže da nešto radimo krivo.[6] Jednadžbe opće

---

[6] U razvoju kvantnih teorija triju negravitacijskih sila fizičari su naišli i na proračune koji su davali beskonačne rezultate. No s vremenom su shvatili da se te beskonačnosti može riješiti sredstvom poznatim kao *renormalizacija*. Beskonačnosti koje nastaju u pokušajima spajanja opće teorije relativnosti i kvantne mehanike mnogo su ozbiljnije i ne mogu se izliječiti renormalizacijom. U novije vrijeme fizičari su shvatili da su beskonačna rješenja znak da se teorija upotrebljava za analizu područja koje je izvan granica svoje primjenjivosti. Budući da je cilj današnjih istraživanja pronaći teoriju čiji je raspon primjenjivosti u načelu neograničen – "konačnu" teoriju – fizičari žele pronaći teoriju u kojoj se beskonačnosti ne pojavljuju, bez obzira na to koliko ekstreman bio analizirani sustav.

teorije relativnosti ne mogu se nositi s uzavrelošću kvantne pjene.

Međutim, uočimo da, kako se vraćamo uobičajenijim udaljenostima (slijedimo niz crteža na slici 5.1 obratnim smjerom), nasumični, žestoki titraji malih razmjera počinju se poništavati – slično kao što, u prosjeku, bankovni račun našeg kompulzivnog pozajmljivača ne pokazuje tragove njegove opsesije – i pojam glatke geometrije za tkivo univerzuma opet postaje upotrebljiv. To je nalik na ono što vidite kad gledate sliku načinjenu od točaka: izdaleka se točke koje tvore sliku stapaju i stvaraju dojam glatke slike, čije varijacije u svjetlini glatko i nježno prelaze s jednog područja u drugo. Kad sliku proučavate na istančanijim razmjerima, vidite da se znatno razlikuje od glatkog dojma koji se dobiva s daljine. To je samo skup odvojenih točkica, a svaka se razlikuje od drugih. No, uočimo da diskretne prirode slike postajemo svjesni tek kad je istražujemo na najmanjim razmjerima; izdaleka izgleda glatko. Slično tome, tkivo prostorvreme-

na doima se glatkim osim kad ga se istražuje s ultramikroskopskom prisutnošću. Zato opća teorija relativnosti djeluje kad je red veličine udaljenosti (i vremena) dovoljno velik – na razmjerima relevantnim za mnoge tipične astronomske primjene – ali postaje nedosljedna kad je red veličine udaljenosti (i vremena) malen. Glavna dogma glatke i blago zakrivljene geometrije potvrđuje se u prostranstvima ali se ruši zbog kvantnih fluktuacija kad je se prostorno ograniči.

Glavna načela opće teorije relativnosti i kvantne mehanike omogućuju nam da izračunamo približni red veličine udaljenosti ispod kojeg bi se trebalo smanjiti kako bi opaki fenomen sa slike 5.1 postao vidljiv. Kad se malena vrijednost Planckove konstante – koja određuje snagu kvantnih efekata – uroti sa slabošću svojstvenoj gravitacijskoj sili, nastaje rezultat koji se naziva Planckovom duljinom, a ona je tako malena da nadmašuje svaku maštu: milijuntinka milijardinke milijardinke milijardinke centimetra (10^{-33}

centimetra).[7] Peta razina na slici 5.1 stoga shematski prikazuje ultramikroskopski krajolik na razmjerima manjim od Planckove duljine. Da bismo dobili dojam o tim razmjerima, kad bismo povećali atom na veličinu poznatog svemira, Planckova duljina jedva bi dosegla veličinu prosječnog drveta.

I tako vidimo da neuskladivost između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike postaje očita samo u prilično ezoteričnom području univerzuma. Zbog toga biste mogli pitati ima li smisla zabrinjavati se zbog toga. Zapravo, zajednica fizičara nije jedinstvena kad je riječ o tom pitanju. Neki fizičari voljni su uočiti problem, ali vedro primjenjuju kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti na probleme čija tipična duljina znatno nadmašuje Planckovu duljinu, kao što

---

[7] Veličina Planckove duljine može se razumjeti jednostavnom logikom, utemeljenom na onome što fizičari nazivaju *dimenzionalnom analizom*. Evo o čemu je riječ. Kada se neka teorija formulira kao

niz jednadžbi, apstraktne simbole mora se povezati s fizikalnim obilježjima svijeta kako bi teorija bila u doticaju sa stvarnošću. Prije svega, moramo uvesti sustav mjera tako da, na primjer, ako se simbol odnosi na duljinu, imamo skalu na kojoj se može interpretirati njegova vrijednost. Ako jednadžbe pokazuju da neka duljina iznosi 5, moramo znati znači li to 5 centimetara, 5 kilometara, 5 svjetlosnih godina itd. U teoriji koja uključuje opću teoriju relativnosti i kvantnu mehaniku, odabir jedinica nameće se po prirodi, na sljedeći način. Postoje dvije prirodne konstante o kojima ovisi opća teorija relativnosti: brzina svjetlosti c i Newtonova gravitacijska konstanta G. Kvantna mehanika ovisi o jednoj prirodnoj konstanti, $\hbar$. Pogledamo li jedinice tih konstanti (npr. c je brzina, pa se izražava kao udaljenost podijeljena s vremenom itd.), vidimo da kombinacija $\sqrt{\hbar G/c^3}$ ima jedinice duljine: $1{,}616 \times 10^{-33}$ centimetara. To je Planckova duljina. Budući da ima gravitacijski i prostornovremenski ulaz (G i c) također ovisi o kvantnoj mehanici ($\hbar$), to određuje mjernu skalu – prirodnu jedinicu duljine – u svakoj teoriji koja pokušava spojiti opću teoriju relativnosti s kvantnom mehanikom. Kad u tekstu kažemo "Planckova duljina", to često mislimo u približnom smislu, želeći naznačiti duljinu koja je nekoliko redova veličine veća ili manja od 10^{-33} centimetara.

zahtijevaju njihova istraživanja. No, drugi fizičari duboko su uznemireni činjenicom da su dva temeljna stupa fizike kakvu poznajemo u biti neuskladivi, bez obzira na to što je problem pojavljuje na ultramikroskopskim udaljenostima. Kako tvrde, ta neuskladivost ističe bitnu manu u našem razumijevanju fizikalnog univerzuma. To mišljenje počiva na nedokazivom, ali duboko proživljenom dojmu da se univerzum, kad ga se razumije na najdubljoj i najelementarnijoj razini, može opisati logički utemeljenom teorijom čiji dijelovi su skladno ujedinjeni. I dakako, bez obzira na to koliko je ta neuskladivost važna u njihovu vlastitom istraživanju, većina fizičara ne želi vjerovati da će se, na najdubljoj razini, naše najdublje teorijsko razumijevanje univerzuma sastojati od matematički nekonzistentnog krpeža dvaju moćnih, ali sukobljenih eksplanatornih okvira.

Da bi razriješili sukob, fizičari su izvodili brojne pokušaje modificiranja ili opće teorije relativnosti ili kvantne mehanike na neki način, ali svi ti pokušaji, premda su često bili

hrabri i domišljati, trpjeli su neuspjeh za neuspjehom.

Naime, sve do otkrića teorije superstruna.[8]

---

[8] Osim teorije struna danas se marljivo radi i na dva druga pristupa općoj teoriji relativnosti i kvantnoj mehanici. Prvi pristup vodi Roger Penrose s Oksfordskog sveučilišta i poznat je kao *twistor theory*. Drugi pristup – dijelom nadahnut Penroseovim radom – vodi Abhay Ashtekar s Pensilvanijskog državnog sveučilišta i poznat je kao metoda *novih varijabli*. Iako u ovoj knjizi nećemo raspravljati o tim pristupima, sve se više spekulira da bi oni mogli biti duboko povezani s teorijom struna i da se možda, zajedno s teorijom struna, sva tri pristupa približavaju istom rješenju za povezivanje opće teorije relativnosti i kvantne mehanike.

3. DIO

KOZMIČKA SIMFONIJA

ŠESTO POGLAVLJE

Čista glazba: osnove teorije superstruna

Glazba je već dugo izvor metafora za one koji se udubljuju u kozmička pitanja. Od drevne pitagorovske "muzike sfera" do "harmonije prirode" koja je stoljećima usmjeravala istraživanja, svi mi tražimo pjesmu prirode u nježnim lutanjima nebeskih tijela i u uzavreloj grozničavosti subatomskih čestica. Otkrićem teorije superstruna glazbene metafore

poprimaju zapanjujuću stvarnost, jer teorija naznačuje da je mikroskopski krajolik prožet strunama čiji način titranja orkestrira evoluciju kozmosa. Prema teoriji superstruna, vjetrovi promjene huče eolskim univerzumom.

Suprotno tome, standardni model smatra elementarne sastavnice univerzuma točkastim sastojcima bez ikakve unutarnje strukture. Koliko god moćan taj pristup bio (kao što smo spomenuli, u biti svako predviđanje standardnog modela o mikrosvijetu potvrđeno je s preciznošću od milijardinke milijardinke metra, što je današnja tehnološka granica), standardni model ne može biti potpuna ni konačna teorija jer ne uključuje gravitaciju. Štoviše, pokušaji da se u taj kvantnomehanički okvir uključi gravitacija nisu uspjeli zbog silovitih fluktuacija u tkivu prostora koje se pojavljuju u ultramikroskopskim razmjerima – to jest, na udaljenostima manjim od Planckove duljine. Taj nerazriješeni sukob potaknuo je potragu za još dubljim razumijevanjem prirode.

Godine 1984. fizičar Michael Green, tada na Queen Mary College, i John Schwarz s California Institute of Technology, dali su prvi uvjerljiv dokaz da bi teorija superstruna (ili ukratko, teorija struna) mogla ponuditi to razumijevanje.

Teorija struna je nova, duboka promjena našeg teorijskog opisa ultramikroskopskih svojstava univerzuma – modifikacija koja, kao što su fizičari polako shvaćali, mijenja Einsteinovu opću teoriju relativnosti upravo tako da ona postane u cijelosti uskladiva sa zakonima kvantne mehanike. Prema teoriji struna, elementarne sastavnice univerzuma *nisu* točkaste čestice. One su sićušne, jednodimenzionalne niti, donekle nalik na beskrajno tanke gumene vrpce koje titraju amo-tamo. No, neka vas ime ne zavara: za razliku od obične strune, koja se sastoji od molekula i atoma, strune u teoriji struna navodno leže duboko u srži materije. Teorija tvrdi da su *one* ultramikroskopski sastojci koji tvore čestice od kojih su načinjeni atomi. Strune teorije struna tako su malene – u prosjeku su dugačke jednu Planckovu duljinu

– da se *doimaju* točkastima čak i kad ih se istražuje našom najmoćnijom opremom.

Već jednostavna zamjena točkastih čestica snopovima struna kao osnovnim sastojcima svega ima dalekosežne posljedice. Prije svega, čini se da teorija struna razrješava sukob između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. Kao što ćemo vidjeti, protežna priroda strune je presudan nov element koji omogućava jedinstven, skladan okvir koji uključuje obje teorije. Drugo, teorija struna uistinu je ujedinjena teorija, jer predlaže da sva materija i sve sile izviru iz jednog osnovnog sastojka: titrajućih struna. Na kraju, o čemu ćemo podrobnije raspraviti u sljedećim poglavljima, osim tih važnih postignuća, teorija struna ponovno radikalno mijenja naše razumijevanje prostorvremena.[1]

---

[1] Stručni čitatelj znat će da se u ovom poglavlju usredotočavamo na *perturbacijsku* teoriju struna; neperturbacijske aspekte razmatramo u poglavljima 12 i 13.

Mladi teorijski fizičar Gabriele Veneziano 1968. godine trudio se pronaći smisao u raznim svojstvima jake nuklearne sile koja se promatralo u eksperimentima. Veneziano, tada istraživač u CERN-u, evropskom laboratoriju s akceleratorima u Ženevi, u Švicarskoj, godinama je radio na raznim aspektima tog problema, sve dok jednog dana nije došao do dojmljivog otkrića. Na svoje veliko iznenađenje, shvatio je da ezoterična formula koju je nekih dvije stotine godina ranije smislio ugledni švicarski matematičar Leonhard Euler u čisto matematičke svrhe – takozvana Eulerova beta-funkcija – jednim potezom opisuje brojna svojstva jakih čestičnih interakcija. Venezianova opservacija ponudila je jak matematički izraz mnogih svojstava jake sile i pokrenula groznicu istraživanja usmjerenih na primjenu Eulerove beta-funkcije i raznih generalizacija, kako bi se opisalo obilje podataka prikupljenih u raznim ciklotronima diljem svije-

ta. No ipak, Venezianova spoznaja u nekom je smislu bila nepotpuna. Poput naučene formule kojom se student služi a da ne razumije njezino značenje ni smisao, činilo se da Eulerova beta-funkcija funkcionira, ali nitko nije znao zašto. Bila je to formula u potrazi za objašnjenjem. To se promijenilo 1970. kada su Yoichiro Nambu sa sveučilišta Chicago, Holger Nielsen s Instituta Niels Bohr i Leonard Susskind sa sveučilišta Stanford otkrili dotad nepoznatu fiziku koja se krije iza Eulerove formule. Ti fizičari dokazali su da, ako elementarne čestice modeliramo kao malene, titrajuće, jednodimenzionalne strune, njihove nuklearne interakcije mogu se opisati upravo Eulerovom funkcijom. Ako su komadi strune dovoljno maleni, razmišljali su, i dalje će izgledati kao točkaste čestice i stoga će biti u skladu s promatranjima u eksperimentima.

Iako je to bila intuitivno jednostavna i lijepa teorija, ubrzo se pokazalo da taj glazbeni opis jake sile nije točan. Po-

četkom 1970-ih su visokoenergijski eksperimenti, kadri dublje prodrijeti u subatomski svijet, pokazali da model teorije struna daje određena predviđanja koja su u izravnom proturječju s promatranjima. U isto vrijeme razvijala se kvantna teorija polja s točkastim česticama, kvantna kromodinamika, a njen golem uspjeh u opisivanju jake sile doveo je odbacivanja teorije struna.

Fizičari čestica mislili su da je teorija struna bačena u ropotarnicu povijesti znanosti, ali nekoliko predanih istraživača ostali su joj vjerni. Na primjer, Schwarz je mislio "da je matematička struktura teorije struna tako prelijepa i ima tako mnogo čudesnih svojstava da zacijelo upućuje na nešto duboko."[2] Jedan od problema koji su fizičari našli u teoriji struna bio je taj što se činilo da je zbunjujuće prebogata. Teorija je sadržavala konfiguracije titrajućih struna koje su imale svojstva slična gluonima, što je potkrepljivalo njezinu ranu tvrdnju da je to teorija jake sile. Ali osim toga je sadržavala dodatne čestice slične glasničkima koje kao da nisu

bile relevantne za promatranja jake sile u eksperimentima. Schwarz i Joël Scherk iz Ecole Normale Supérieure su 1974. načinili hrabar korak koji je taj navodni porok pretvorio u vrlinu. Proučavajući zbunjujuće pravilnosti titranja čestica nalik glasničkima, shvatili su da njihova svojstva savršeno odgovaraju svojstvima hipotetične čestice gravitacijske sile – gravitona. Iako ti "najmanji paketići" gravitacijske sile zasad još nisu viđeni, teoretičari mogu pouzdano predviđati neka osnovna svojstva koja oni moraju posjedovati, a Scherk i Schwarz otkrili su da ta svojstva mogu ostvariti upravo određenim pravilnostima titranja. Na temelju toga, Scherk i Schwarz zaključili su da teorija struna nije uspjela u svom početnom pokušaju jer su fizičari neopravdano suzili njezin doseg. Teorija struna nije samo teorija jake sile, objavili su; to je kvantna teorija koja uključuje i gravitaciju.[3]

---

2 Intervju s Johnom Schwarzom, 23. prosinca 1997.

3 Slične prijedloge neovisno su objavili Tamiaki Yoneya te Korkut

Zajednica fizičara nije prihvatila taj prijedlog s nesputanim entuzijazmom. Zapravo, Schwarz se sjeća da je "naš rad bio potpuno zanemaren".[4] Put napretka već je bio posut brojnim neuspjelim pokušajima ujedinjenja gravitacije i kvantne mehanike. Pokazalo se da je teorija struna pogriješila u svom prvom pokušaju opisa jake sile, i mnogima se činilo da nema smisla poslužiti se tom teorijom u svrhu ostvarenja još težeg cilja. Što je još gore, sljedeće studije pokazale su da teorija struna i kvantna mehanika trpe i od svojih vlastitih malih sukoba. Činilo se da se gravitacijska sila opet oduprla uključenju u mikroskopski opis univerzuma.

Takva je bila situacija sve do 1984. U prijelomnom članku, vrhuncu više od deset godina intenzivnog istraživanja koje je većina fizičara uglavnom ignorirala, a često i odlučno odbacivala, Green i Schwarz ustvrdili su da se mali kvantni sukob od kojeg trpi kvantna teorija može razriješiti. Štoviše, pokazali su da tako nastala teorija ima dovoljno širine da obuhvati sve četiri sile i svu materiju. Kad se glas o tom

rezultatu proširio zajednicom fizičara diljem svijeta, stotine fizičara čestica ostavljali su svoje istraživačke projekte i svim snagama se bacili na ono što su smatrali posljednjim teorijskim bojištem u prastaroj potrazi za spoznajom najdubljeg mehanizma univerzuma.

Fiziku sam upisao u listopadu 1984. na sveučilištu Oxford. Iako sam s uzbuđenjem učio o kvantnoj teoriji polja, baždarnoj teoriji i općoj teoriji relativnosti, među starijim studentima vladao je dojam da za fiziku čestica baš i nema budućnosti. Standardni model se uvriježio, a njegov dojmljiv uspjeh u predviđanju ishoda eksperimenata upućivao je na to da je njegova potvrda samo pitanje vremena i usklađivanja potankosti. Otići preko njegovih granica kako bi se uključilo gravitaciju, a možda i objasnilo podatke do-

---

Bardakci i Martin Halpern. Švedski fizičar Lars Brink također je znatno pridonio ranom razvoju teorije struna.

[4] Intervju s Johnom Schwarzom, 23. prosinca 1997.

bivene eksperimentima na koje se oslanja – 19 brojeva koji izražavaju mase elementarnih čestica, njihove naboje sila i relativnu snagu sila, brojeve koji su poznati iz eksperimenata ali ih se ne razumije teorijski – bio je tako zastrašujuće težak problem da su od njega zazirali svi osim najhrabrijih fizičara. Ali, šest mjeseci poslije raspoloženje se stubokom promijenilo. Uspjeh Greena i Schwarza oduševio je čak i brucoše i prethodnu blaziranost zamijenio je ohrabrujući dojam da svjedočimo važnom trenutku u povijesti fizike. Velik broj nas radili smo do duboko u noć pokušavajući ovladati golemim područjima teorijske fizike i apstraktne matematike koja su potrebna da bi se teorija struna razumjela.

Razdoblje od 1984. do 1986. postalo je poznato kao "prva revolucija superstruna". U te tri godine fizičari iz cijeloga svijeta napisali su više od tisuću istraživačkih članaka. Ti radovi nepobitno su dokazali da mnoga svojstva standardnog modela – svojstva koja se otkrivalo desetljećima marljivog istraživačkog rada – *izviru prirodno* i jednostavno iz širo-

ke strukture teorije struna. Kako je rekao Michael Green: "Čim upoznate teoriju struna i shvatite da gotovo sve glavne spoznaje u fizici proteklih stotinu godina izviru – i to s takvom elegancijom – iz tako jednostavnog polazišta, postane vam jasno da je ta, nevjerojatno uvjerljiva teorija, za klasu iznad svih drugih."[5] Štoviše, za mnoga od tih svojstava, kao što ćemo vidjeti, teorija struna nudi mnogo potpunije i prihvatljivije objašnjenje od onog u standardnom modelu. Te spoznaje uvjerile su mnoge fizičare da je teorija struna na dobrom putu da ispuni svoje obećanje da će postati konačnom ujedinjenom teorijom.

No ipak, teoretičari struna su uvijek iznova nailazili na znatne prepreke. U istraživanjima na području teorijske fizike često imamo posla s jednadžbama koje je naprosto preteško razumjeti i analizirati. Fizičari tada obično ne odustanu nego pokušaju jednadžbe riješiti približno. Situacija u

---

5 Intervju s Michaelom Greenom, 20. prosinca 1997.

teoriji struna još je teža. Pokazalo se da je već i *samo odrediti* same te jednadžbe tako teško da su dosad izvedene samo njihove približne verzije. Nakon nekoliko godina dramatičnog napretka u vrijeme prve revolucije superstruna fizičari su otkrili da su aproksimacije kojima su se služili nedovoljno dobre da bi mogle odgovoriti na velik broj bitnih pitanja, što je sprečavalo dalji napredak. Bez konkretnih prijedloga za nadilaženje približnih metoda, mnogi fizičari koji su radili na teoriji struna razočarali su se i vratili se svojim starim istraživačkim projektima. Za one koji su ostali, kraj 1980-ih i početak 1990-ih bilo je vrijeme kušnje. Poput blaga koje je zaključano u sefu i vidljivo samo kroz izazovnu rupicu, teorija je i dalje privlačila svojom ljepotom i velikodušnim obećanjima, ali nitko nije imao ključ za njezinu moć. Dugotrajnu sušu povremeno su prekidala važna otkrića, ali svakome tko je radio na tom području bilo je jasno da su potrebne nove metode kako bi se nadišlo tadašnje aproksimacije.

A tada je u predavanju na konferenciji Strings 1995, odr-

žanoj na sveučilištu Južne Kalifornije – predavanju koje je ostavilo bez daha publiku sastavljenu od vrhunskih svjetskih fizičara – Edward Witten najavio plan za sljedeći korak i tako pokrenuo "drugu revoluciju superstruna". U vrijeme dok ovo pišem, teoretičari struna marljivo rade kako bi izbrusili nove metode za svladavanje teorijskih prepreka koje su kočile napredak. Teškoće koje su pred njima stavit će na tešku kušnju tehničku moć svjetskih teoretičara superstruna, ali svjetlo na kraju tunela, iako je još daleko, ipak postaje vidljivo.

U ovom poglavlju i nekoliko sljedećih opisat ćemo razumijevanje teorije struna koje izvire iz prve revolucije superstruna i kasnijeg razvoja, prije druge revolucije superstruna. Tu i tamo ćemo naznačiti nove spoznaje koje je ona donijela, ali o najnovijem razvoju raspravljat ćemo u poglavljima 12 i 13.

Kao što smo spomenuli na početku ovog poglavlja i ilustrirali na slici 1.1, teorija struna tvrdi da, kad bismo pretpostavljene točkaste čestice standardnog modela mogli istražiti sa znatno većom preciznošću nego što to danas možemo, vidjelo bi se da se sve one sastoje od jedne sićušne kružne strune koja titra.

Iz razloga koji će uskoro postati jasni, duljina tipične kružne strune je oko jedne Planckove duljine, oko stotinu milijardi milijardi (10^{20}) puta manja od atomske jezgre. Nije čudo što naši današnji eksperimenti nisu kadri razlučiti mikroskopske strune: one su sićušne čak i u razmjerima subatomskih čestica. Da bismo izravno vidjeli da struna nije točkasta čestica trebao bi nam ciklotron koji sudara materiju energijom oko milijun milijardi puta većom od one koju proizvodi najveći do danas sagrađen ciklotron.

Ukratko ćemo opisati zapanjujuće implikacije koje na-

staju kad točkaste čestice zamijenimo strunama, ali idemo prvo razmotriti osnovnije pitanje: od čega su strune načinjene?

Dva su moguća odgovora na to pitanje. Prvi glasi da su strune istinski fundamentalne – one su "atomi", *nedjeljivi sastojci*, u istinskom smislu starih Grka. Kao apsolutno najmanji sastojci svega, oni znače kraj puta – posljednju rusku babušku – u brojnim slojevima supstrukture u mikroskopskom svijetu. S toga gledišta, iako strune imaju prostornu protežnost, pitanje od čega se sastoje nema smisla. Kad bi strune bile načinjene od nečega manjega, ne bi bile fundamentalne. Umjesto toga, ono od čega bi se strune sastojale odmah bi ih zamijenilo i polagalo pravo na to da bude osnovni sastojak univerzuma. Poslužimo li se svojom lingvističkom analogijom, odlomci se sastoje od rečenica, rečenice od riječi, a riječi od slova. A od čega se sastoji slovo? S lingvističkoga gledišta, to je kraj puta. Slova su slova – ona

su fundamentalni gradivni elementi pisanoga jezika; nema dublje supstrukture. Pitanje o njihovu sastavu nema smisla. Slično tome, struna je naprosto struna – jer nema ničeg fundamentalnijeg i ne može se reći da se struna sastoji od neke druge supstancije.

To je prvi odgovor. Drugi odgovor temelji se na jednostavnoj činjenici da još ne znamo je li teorija struna ispravna ili konačna teorija prirode. Ako je teorija struna promašila, onda možemo zaboraviti na strune i irelevantno pitanje od čega se sastoje. Premda to jest mogućnost, istraživanja od sredine 1980-ih uvjerljivo upućuju na to da je to vrlo malo vjerojatno. No, povijest nas uči da svaki put kad se naše razumijevanje svemira produbi, nađemo još manje mikroskopske sastojke koji tvore još istančaniju razinu materije. Dakle, sljedeća mogućnost, ako se pokaže da strune nisu konačna teorija, glasi da su one još jedna ljuska kozmičkog luka, ljuska koja postaje vidljiva na Planckovoj duljini, ali nisu posljednji sloj. U tom slučaju, možda se strune sastoje

od još manjih struktura. Teoretičari struna pokrenuli su to pitanje te i dalje rade na njemu. Danas već postoje zanimljive naznake da bi strune mogle imati supstrukturu, ali još nema jasnih dokaza. Konačnu riječ o tom pitanju dat će vrijeme i intenzivna istraživanja.

Osim nekih spekulacija u poglavljima 12 i 15, u svom izlaganju pristupamo strunama na način koji se predlaže u prvom odgovoru – to jest, smatrat ćemo da su strune fundamentalni sastojak prirode.

Ujedinjenje putem teorije struna

Osim svoje nesposobnosti da uključi gravitacijsku silu, standardni model ima još jedan nedostatak: ne postoji objašnjenje za pojedinosti u njegovoj strukturi. Zašto je priroda odabrala određen popis čestica i sila, izložen u prethodnim

poglavljima i naveden u tablicama 1.1 i 1.2? Zašto devetnaest parametara koji kvantitativno opisuju te sastojke imaju upravo one vrijednosti koje imaju? Ne možemo se oteti dojmu da su njihov broj i detaljna svojstva krajnje proizvoljni. Postoji li dublje razumijevanje koje se krije iza tih nasumičnih sastojaka, ili su precizna fizikalna svojstva univerzuma "odabrana" svojevrsnom lutrijom?

Sam standardni model nikako ne može ponuditi objašnjenje jer popis čestica i njihova svojstva smatra *ulaznim podacima* izmjerenim u eksperimentima. Kao što se vrijednost dionica na burzi ne može upotrijebiti da bi se odredila vrijednost vašeg portfolija bez ulaznih podataka o vašim početnim ulaganjima, tako ni standardni model ne može poslužiti za donošenje predviđanja bez ulaznih podataka o fundamentalnim svojstvima čestica.[6] Nakon što eksperimentalni fizičari čestica pomno izmjere te podatke, teoretičari mogu primijeniti standardni model za donošenje provjerljivih predviđanja, na primjer o tome što će se dogoditi

kad se pojedine čestice sudare u ciklotronu. Ali standardni model ne može ništa bolje objasniti svojstva fundamentalnih čestica u tablicama 1.1 i 1.2 nego što današnji indeks Dow Jones može objasniti vaše početno ulaganje u dionice prije deset godina.

Zapravo, da su eksperimenti otkrili ponešto drukčiji sadržaj čestica u mikroskopskom svijetu, koje možda stupaju u interakcije s ponešto drukčijim silama, te promjene bi se vrlo lako unijele u standardni model; bilo bi dovoljno dati teoriji drukčije ulazne parametre. U tom smislu, struktura

---

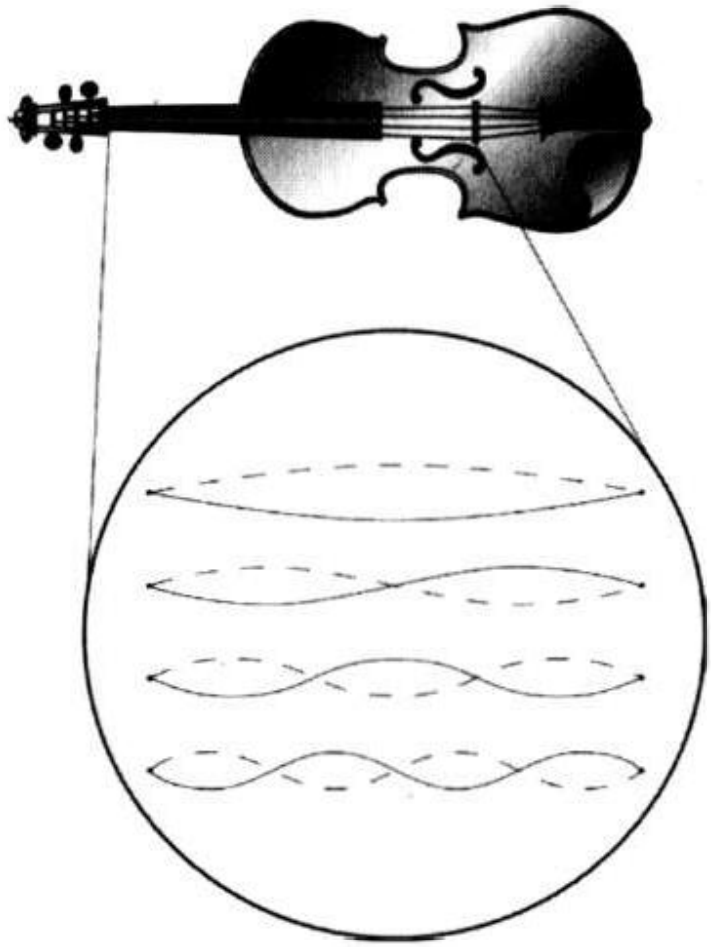
[6] Standardni model ipak uključuje mehanizam kojim čestice dobivaju masu – *Higgsov* mehanizam, nazvan po škotskom fizičaru Peteru Higgsu. Ali s gledišta objašnjavanja mase čestica, on samo premješta teret na objašnjavanje svojstava hipotetične "masotvorne čestice" – takozvanog *Higgsovog bozona*. Provode se eksperimenti kojima se ta čestica traži, ali opet, ako se pronađe i izmjere joj se svojstva, to će biti ulazni podaci za standardni model, za koje teorija ne nudi nikakvo objašnjenje.

standardnog modela odviše je fleksibilna da bi mogla objasniti svojstva elementarnih čestica, jer se može prilagoditi širokom rasponu mogućnosti.

Teorija struna dramatično je drukčija. To je jedinstveno i nefleksibilno teorijsko zdanje. Ono ne zahtijeva nikakav input osim jednog jedinog broja, koji ćemo opisati niže, koji određuje referentnu ljestvicu za mjerenja. Njezina eksplanatorna moć obuhvaća sva svojstva mikrosvijeta. Da bismo to razumjeli, razmotrimo prvo poznatije strune, poput onih na violini. Svaka struna može biti podvrgnuta velikoj raznolikosti (zapravo, beskonačnosti) različitih obrazaca titranja, poznatih kao rezonancije, poput onih prikazanih na slici 6.1. To su valne pravilnosti čiji su vrhovi i dolovi podjednako razmaknuti i savršeno se uklapaju između dvaju fiksiranih krajeva strune. Naše uši osjećaju te različite pravilnosti titranja kao različite muzičke tonove. Struna može održavati rezonantne pravilnosti titranja zbog toga što se njezini podjednako razmaknuti vrhovi i dolovi savršeno raspoređuju

po dužini kojom se struna proteže. Neki primjeri su na slici 6.2. Evo i glavne činjenice: kao što različiti pravilni titraji violinske žice stvaraju različite muzičke tonove, *tako različiti pravilni titraji fundamentalne strune stvaraju različite mase i naboje sila*. Budući da je to glavna tvrdnja, ponovimo je. Prema teoriji struna, svojstva elementarne "čestice" – njezina masa i razni naboji sila – određena su preciznim pravilnostima titranja koje izvodi njezina unutarnja struna.

Tu povezanost najlakše je razumjeti za masu čestice. Energija pojedinog modela titranja strune ovisi o amplitudi titranja – maksimalnoj udaljenosti između vrhova i dolova – i njezinoj valnoj duljini – udaljenosti između jednog i drugog vrha. Što je amplituda veća i što je valna duljina kraća, to je energija veća. To je odraz onoga što biste intuitivno i očekivali – žustriji titraji imaju više energije, a manje žustri imaju je manje. Dva primjera dajemo na slici 6.3. I to nam je poznato, jer ako jače potegnete violinsku strunu, ona će

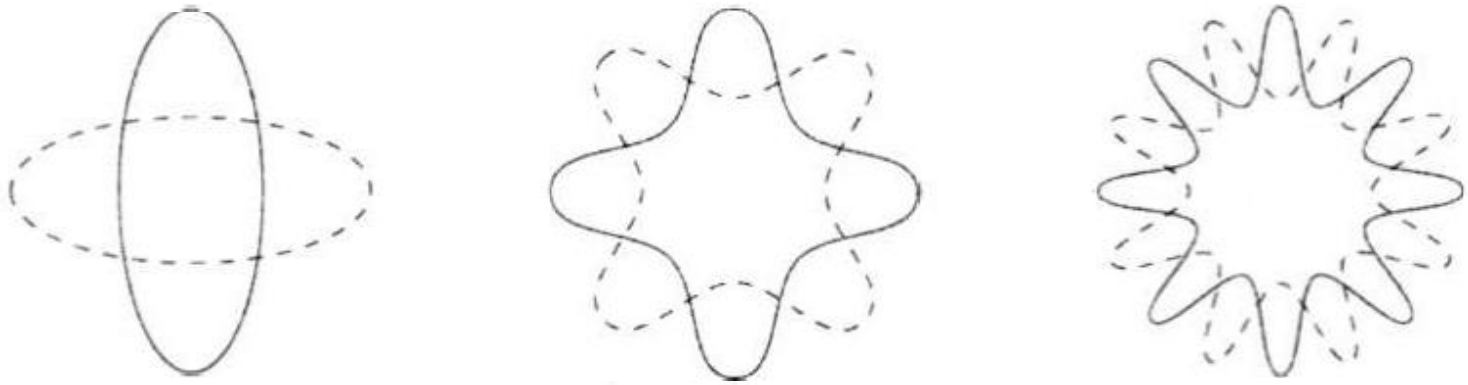


Slika 6.1 Strune na violini vibriraju rezonantnim obrascima u kojima se uvijek cijeli broj vrhova i dolova precizno uklapa između dvaju krajeva.

žustrije titrati, a ako je potegnete nježno, titrat će blaže. Nadalje, iz specijalne teorije relativnosti znamo da su energija

dalje, iz specijalne teorije relativnosti znamo da su energija i masa dvije strane istog novčića: veća energija znači veću masu i obratno. Dakle, prema teoriji struna, *masa* elementarne čestice određena je *energijom* titraja njezine unutarnje strune. Teže čestice imaju unutarnje strune koje vibriraju energičnije, a lakše unutarnje strune lakših čestica titraju manje energično.

Budući da masa čestice određuje njezina gravitacijska svojstva, vidimo da postoji izravna asocijacija između načina titranja struna i reakcije čestice na gravitacijsku silu. Iako je ta logika donekle apstraktnija, fizičari su otkrili da slična povezanost postoji između drugih aspekata načina titranja čestice i njezinih svojstava s obzirom na druge sile. Električni naboj, naboj slabe sile i naboj jake sile koje nosi pojedina struna, na primjer, određeni su preciznim načinom njezina titranja. Štoviše, ista ideja vrijedi i za same glasničke čestice. Čestice poput fotona, slabih baždarnih bozona i gluona samo su drugi rezonantni modeli titranja struna. A poseb-



Slika 6.2 Petlje u teoriji struna vibriraju u rezonantnim pravilnostima – sličnim onima u violinskim žicama – u kojima se cijeli broj vrhova i dolova uklapa duž njihove prostorne protežnosti.

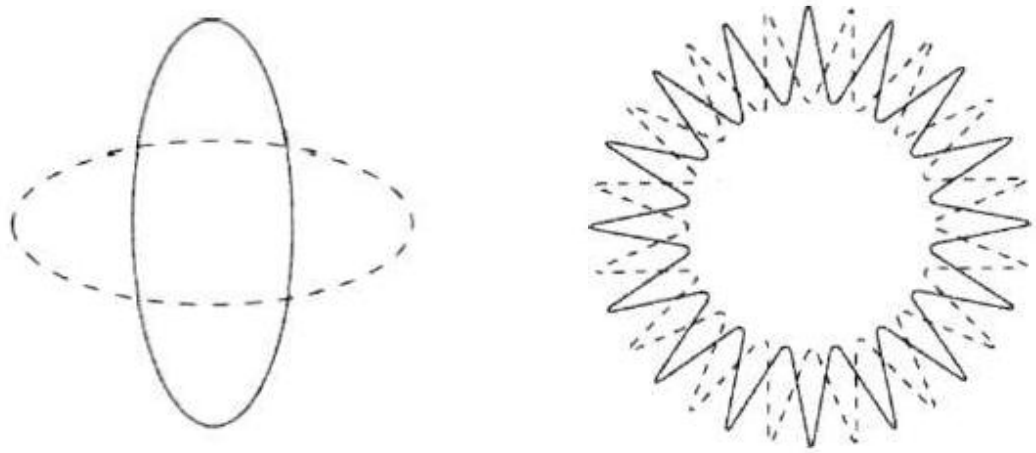
no je važno da među modelima titranja struna jedan točno odgovara svojstvima gravitona, čime gravitacija postaje integralnim dijelom teorije struna.[7]

Tako vidimo da, prema teoriji struna, promatrana svojstva svake elementarne čestice izviru iz toga što njezina unutarnja struna titra na određeni rezonantni način. Ta perspektiva itekako se razlikuje od one koju su fizičari zastupali prije otkrića teorije struna; u ranijoj perspektivi, razlike između fundamentalnih čestica objašnjavale su se govoreći

da je, zapravo, svaka vrsta čestica načinjena od "drukčijeg materijala". Iako se svaku česticu smatralo elementarnom, mislilo se da svaka sadrži drukčiju vrsta "materijala". Na primjer, elektronski "materijal" imao je negativan električni naboj, a "materijal" od kojeg se sastoje neutrini nije imao nikakav električni naboj. Teorija struna radikalno mijenja tu sliku objavljujući da je "materijal" sve materije i svih sila

---

[7] Matematički obrazovanom čitatelju napominjemo da se povezanost između obrasca titranja strune i naboja sile može preciznije opisati kako slijedi. Kad se gibanje strune kvantizira, njezina moguća vibracijska stanja predstavljena su vektorom u Hilbertovu prostoru, otprilike kao u svakom kvantnomehaničkom sustavu. Te se vektore može označiti njihovim svojstvenim vrijednostima komutirajućih hermitskih operatora. Među tim operatorima su i hamiltonijan, čije svojstvene vrijednosti daju vibracijskom stanju energiju te stoga i masu, kao i operatori koji generiraju razne baždarne simetrije koje teorija poštuje. Svojstvene vrijednosti potonjih operatora daju naboje sila koje prenosi pridruženo vibracijsko stanje strune.



Slika 6.3 Žustriji načini titranja imaju više energije od manje žustrih.

isti. Svaka elementarna čestica sastoji se od jedne strune – to jest, svaka čestica jest jedna struna – a sve strune su apsolutno identične. Razlike između čestica nastaju zato što njihove strune imaju drukčije rezonantne modele titranja. Ono što se čini da su različite elementarne čestice zapravo su drukčije "note" na fundamentalnoj struni. Univerzum – koji se sastoji od ogromnog broja tih titrajućih struna – sličan je kozmičkoj simfoniji.

Ovaj pregled pokazuje kako teorija struna nudi istinski

čudesan ujedinjujući okvir. Svaka čestica materije i svaki prijenosnik sile sastoji se od čestice čiji model titranja je njezin "otisak prsta". Budući da se svaki fizikalni događaj, proces ili pojava u univerzumu može na elementarnoj razini opisati kao sile koje djeluju između tih elementarnih sastavnica materije, teorija struna obećava jedan, sveobuhvatan i ujedinjen opis fizikalnog univerzuma: teoriju svega (T.O.E.).

Glazba teorije struna

Iako teorija struna odbacuje prethodno poimanje elementarnih čestica bez strukture, stari jezik teško odumire, posebno s obzirom na to da pruža točan opis stvarnosti sve do najmanjeg reda veličine. Slijedeći uobičajenu praksu u fizici, stoga ćemo i dalje govoriti o "elementarnim česticama", ali uvijek ćemo podrazumijevati "ono što su naizgled elemen-

tarne čestice ali zapravo su sićušni komadići titrajuće strune". U prethodnom odjeljku iznijeli smo pretpostavku da su masa i naboji sila tih elementarnih čestica rezultat načina titranja njihovih struna. To nas vodi do sljedeće spoznaje: ako uspijemo precizno razraditi dopuštene rezonantne pravilnosti titranja fundamentalnih struna – "tonove", recimo to tako, koje mogu svirati – moći ćemo objasniti promatrana svojstva elementarnih čestica. Dakle, teorija struna prvi put postavlja okvir za objašnjavanje svojstava čestica koja promatramo u prirodi.

Prema tome, na ovom stupnju trebali bismo "zgrabiti" strunu i "potezati" je na sve moguće načine kako bismo utvrdili moguće pravilnosti rezonantnog titranja. Ako je teorija struna ispravna, trebali bismo otkriti da mogući modeli daju upravo promatrana svojstva materijalnih i glasničkih čestica u tablici 1.1 i 1.2. Naravno, struna je premalena da bismo te eksperimente izveli doslovno kako smo ih opisali.

Umjesto toga, služeći se matematičkim opisima možemo *teorijski* zatitrati strunu. Sredinom 1980-ih mnogi zastupnici struna vjerovali su da matematička analiza potrebna za to samo što nije objasnila sva konkretna svojstva univerzuma na njegovoj najdubljoj mikroskopskoj razini. Neki zanesени fizičari objavili su da je teorija svega napokon otkrivena. Osvrnemo li se na to nakon više od deset godina, vidimo da je euforija koju je to uvjerenje potaknulo bila preuranjena. Teorija struna je teorija svega u začetku, ali pred njom je još mnogo prepreka koje nas sprečavaju da izvedemo spektar titraja struna s preciznošću koja je potrebna da ih se usporedi s rezultatima eksperimenata. Stoga danas još ne znamo mogu li se fundamentalna obilježja našeg univerzuma, navedena u tablicama 1.1 i 1.2, objasniti teorijom struna. Kao što ćemo raspraviti u poglavlju 9, pod određenim pretpostavkama koje ćemo jasno izložiti, teorija struna može dati univerzum sa svojstvima koja se kvalitativno slažu s pozna-

tim podacima o česticama i silama, ali izvođenje detaljnih numeričkih predviđanja iz teorije zasad nadmašuje naše mogućnosti. I tako, iako je okvir teorije struna, za razliku od standardnog modela točkastih čestica, *kadar* dati objašnjenje *zašto* čestice i sile imaju svojstva koja imaju, mi ga još ne možemo izvesti. No, teorija struna je tako bogata i dalekosežna da smo, iako još ne možemo odrediti njezina najdetaljnija svojstva, sposobni pružiti uvid u obilje novih fizikalnih pojava koje slijede iz teorije, kao što ćemo vidjeti u sljedećim poglavljima.

U sljedećim poglavljima ćemo i nešto detaljnije raspravljati o stanju prepreka teoriji, ali uputno je prvo ih razumjeti na općoj razini. Strune u svijetu oko nas obilježene su raznolikim napetostima. Na primjer, vezice u paru cipela obično su prilično labave u usporedbi sa strunom nategnutom od jednog do drugog kraja violine. No i jedna i druga su pod mnogo manjom napetošću od čeličnih žica klavira. Jedini

broj koji teorija struna zahtijeva da bi se uspostavila njezina sveobuhvatna ljestvica je odgovarajuća napetost njezinih petlji. Kako se ta napetost određuje? Pa, ako zatitramo fundamentalnu strunu doznat ćemo nešto o njezinoj krutosti, a tako bismo mogli izmjeriti njezinu napetost slično kao što se čini kad se mjeri napetost poznatih nam, svakodnevnih struna. No budući da su fundamentalne strune tako sićušne, taj se pristup ne može ostvariti i potrebna je neizravna metoda. Godine 1974, kad su Scherk i Schwarz sugerirali da je jedan konkretan model titranja struna čestica graviton, uspjeli su se poslužiti takvim neizravnim pristupom i time predvidjeti napetost struna u teoriji struna. Njihovi izračuni otkrili su da je iznos sile koju bi prenosio predloženi gravitonski model titranja struna obratno proporcionalan napetosti strune. A budući da bi graviton trebao prenositi gravitacijsku silu – silu koja je po prirodi prilično slaba – izračunali su da to znači kolosalnu napetost od tisuću mi-

lijardi milijardi milijardi milijardi (10^{39}) tona, što je takozvana Planckova napetost. Fundamentalne strune su stoga krajnje krute u usporedbi s poznatijim nam primjerima. To ima tri važne posljedice.

Tri posljedice krutih struna

Prvo, dok su strune violine i klavira pričvršćene, što osigurava da imaju stalnu duljinu, nikakav sličan okvir ne određuje veličinu fundamentalne strune. Umjesto toga, golema napetost strune uzrokuje to da se petlje teorije struna smanje na sićušnu veličinu. Podrobni izračuni otkrivaju da trpjeti Planckovu napetost znači imati tipičnu Planckovu duljinu – 10^{-33} centimetara – kao što smo već napomenuli.[8]

Drugo, zbog te ogromne napetosti, tipična energija titrajuće petlje u teoriji struna je o ekstremno visoka. Da bismo to razumjeli, napominjemo da, što je veća napetost koju

struna trpi, to je teže potaknuti je da zatitra. Na primjer, mnogo je lakše potegnuti violinsku žicu i pokrenuti njeno titranje nego klavirsku žicu. Dakle, dvije strune koje trpe različite napetosti i titraju na posve isti način neće imati istu

---

[8] Na temelju spoznaja druge revolucije superstruna (izložene u poglavlju 12), Witten, a posebno Joe Lykken iz Fermi National Accelerator Laboratory pronašli su malenu, ali moguću rupu u tom zaključku. Posluživši se tom spoznajom, Lykken je predložio da bi bilo moguće da strune budu pod manjom napetošću, te stoga i da budu veće nego što se prvotno mislilo. Zapravo, toliko velike da bi bile opazive sljedećom generacijom akceleratora čestica. Ako se pokaže da je ta malo vjerojatna mogućnost istinita, ostvarit će se uzbudljiva mogućnost da mnoge važne implikacije teorije struna o kojima raspravljamo u ovom i sljedećim poglavljima budu provjerljive eksperimentima već za deset godina. No čak i u "konvencionalnijem" scenariju koji predlažu teoretičari struna, u kojem su strune obično dugačke oko 10^{-33} centimetara, postoje neizravni načini da ih se potraži u eksperimentima, o čemu ćemo u poglavlju 9.

energiju. Struna s višom napetošću imat će više energije od strune s nižom napetošću jer se više energije mora uložiti da bi zatitrala.

To nas upozorava na činjenicu da energiju titrajuće strune određuju dvije stvari: precizno određen način na koji ona titra (žustrije titranje odgovara višoj energiji) i napetost strune (veća napetost odgovara višoj energiji). Isprva bi vas taj opis mogao navesti da pomislite kako bi preuzimanjem blažeg načina titranja – modela s manjim amplitudama, s manje vrhova i dolova – struna mogla utjelovljivati manje energije. No, kao što smo vidjeli u drukčijem kontekstu u poglavlju 4, kvantna mehanika nam govori da ta logika nije uvijek ispravna. Poput svih vibracija i valnih poremećaja, kvantna mehanika implicira da oni mogu postojati samo u diskretnim jedinicama. Pojednostavljeno govoreći, kao što je iznos novca koji nosi stanar u zgradi *cijeli broj* pomnožen s novčanom denominacijom koju je dobio, tako je i energija

utjelovljena u modelu titranja strune *cijeli broj* pomnožen s minimalnom denominacijom energije. Konkretno, ta minimalna denominacija energije proporcionalna je napetosti strune (a proporcionalna je i broju vrhova i dolova u pojedinom modelu titranja), dok je umnožak cijelog broja određen amplitudom titranja.

Poanta ove rasprave je u sljedećem: budući da su minimalne denominacije energije proporcionalne napetosti strune, a kako je ta napetost golema, fundamentalne minimalne energije su također goleme, u razmjerima za elementarne čestice. One su umnošci takozvane Planckove energije. Da bismo stekli dojam o razmjerima, ako prevedemo Planckovu energiju u masu služeći se slavnom Einsteinovom formulom za pretvorbu, $E = mc^2$, te energije odgovaraju masama koje imaju red veličine deset milijardi milijardi (1019) masa protona. Ta divovska masa – barem po standardima elementarnih čestica – zove se *Planckova masa*; otprilike je

jednaka masi čestice prašine ili kulturi od oko milijun prosječnih bakterija. I tako, tipični maseni ekvivalent titrajuće petlje u teoriji struna je uvijek neki cijeli broj (1, 2, 3...) puta Planckova masa. Fizičari to često izražavaju govoreći da je Planckova skala "prirodna" ili "tipična" energijska skala (a time i skala mase) u teoriji struna.

Tako se postavlja ključno pitanje, izravno povezano s ciljem reproduciranja svojstava čestica u tablicama 1.1 i 1.2: ako je "prirodna" energijska skala u teoriji struna otprilike deset milijardi milijardi puta veća od energije protona, kako bi teorija struna mogla objasniti mnogo lakše čestice – elektrone, kvarkove, fotone i tako dalje – koje čine svijet oko nas?

Odgovor ponovno daje kvantna mehanika. Prema načelu neodređenosti, ništa nikad nije u savršenom mirovanju. Svi predmeti podložni su kvantnoj groznici, jer kad ne bi bili, znali bismo savršeno precizno gdje su i koliko brzo se gibaju, što bi značilo kršenje Heisenbergovog diktuma. To

vrijedi i za petlje u teoriji struna; koliko god se struna doi-
mala mirnom, uvijek će biti podvrgnuta određenoj količini
kvantnog titranja. Važno je to, kao što je otkriveno 1970-ih,
što može doći do *poništenja* energije između tih kvantnih
trzaja i intuitivno razumljivije vrste titranja struna o kojoj
smo gore raspravili i ilustrirali je na slikama 6.2 i 6.3. Za-
pravo, zbog čudnovatosti kvantne mehanike, energija pove-
zana s kvantnim trzajima strune je *negativna*, a to *smanjuje*
ukupnu energiju titrajuće strune za količinu koja je otpri-
like jednaka Planckovoj energiji. To znači da se modeli ti-
tranja struna najniže energije, o čijoj energiji bismo naivno
očekivali da je otprilike jednaka Planckovoj energiji (tj. 1
puta Planckova energija), uglavnom poništavaju, čime daju
titraje relativno niske ukupne energije – energije čiji su ekvi-
valenti mase slični onima materijalnih i glasničkih čestica,
prikazanima u tablicama 1.1 i 1.2. Dakle, ti titraji najniže
energije trebali bi povezati teorijski opis struna s eksperi-

mentima dostupnim svijetu fizike čestica. Kao važan primjer, Scherk i Schwarz otkrili su da su za vibracijski model čija ga svojstva čine kandidatom za glasničku česticu graviton, poništenja energije *savršena*, a rezultat toga je glasnička čestica gravitacijske sile koja ima nultu masu. Upravo to se očekuje za graviton; gravitacijska sila prenosi se brzinom svjetlosti, a samo čestice bez mase putuju tom, najvećom mogućom brzinom. No, titrajne kombinacije niske energije u velikoj su mjeri iznimka, a ne pravilo. Tipičnija titrajuća fundamentalna struna odgovara čestici čija je masa milijardama i milijardama puta veća od mase protona.

To nam govori da razmjerno lagane fundamentalne čestice iz tablica 1.1 i 1.2 trebaju izvirati, u nekom smislu, iz fine magle nad uzavrelim oceanom energijskih struna. Čak i čestica teška poput vršnog kvarka, mase oko 189 puta veće od mase protona, može izvirati iz titrajuće strune samo ako se divovska energija strune, reda veličine Planckove ener-

gije, poništi trzajima kvantne neodređenosti, i to tako da poništavanje izostane samo jedanput u stotinu milijuna milijardi slučajeva. To je kao da sudjelujete u televizijskoj igri *Prava cijena* i Bob Barker vam da deset milijardi milijardi dolara i izazove vas da kupite – u ovoj analogiji, poništite – sve proizvode osim onih koji stoje 189 dolara, ni dolar više ni manje. Dobiti tako golem, ali vrlo precizno određen budžet, a da ne znate točne cijene pojedinih artikala, stavilo bi na ozbiljnu kušnju i najiskusnijeg *shoppera*. U teoriji struna, gdje je novac energija, približni proračuni nedvojbeno su pokazali da se analogna poništavanja energije zasigurno *mogu* dogoditi, ali iz razloga koji će postajati sve jasnijima u sljedećim poglavljima, na današnjoj razini teorije nije moguće s dovoljnom preciznošću provjeriti ta poništavanja. No ipak, kao što smo već naznačili, vidjet ćemo da mnoga druga svojstva teorije struna nisu tako ovisna o tako istančanim pojedinostima i može ih se izlučiti i razumjeti bez ograda.

To nas vodi do treće posljedice goleme vrijednosti napetosti struna. Strune mogu izvoditi beskonačan broj različitih oblika titranja. Na primjer, na slici 6.2 prikazali smo početke beskrajnog niza njihovih mogućnosti, koje karakterizira sve veći broj vrhova i dolova. Ne znači li to da bi morao postojati odgovarajući beskrajni niz elementarnih čestica, naizgled u sukobu s eksperimentalnom situacijom koju smo sažeto iznijeli u tablicama 1.1 i 1.2?

Odgovor je pozitivan: ako je teorija struna ispravna, svaki od beskonačno mnogo rezonantnih oblika titranja struna trebao bi odgovarati nekoj elementarnoj čestici. No bitno je to što visoka napetost osigurava da svi osim nekoliko tih titrajnih modela odgovaraju ekstremno teškim česticama (tih nekoliko su titrajni modeli najniže energije u kojima dolazi do gotovo savršenog poništavanja s trzajima kvantne strune). I u ovom slučaju pridjev "težak" znači mnogo puta teži od Planckove mase. Budući da naši najjači akcelerato-

ri čestica mogu doseći energije reda veličine od samo tisuću masa protona, što je manje od milijuntinke milijardinke Planckove energije, vrlo smo daleko od mogućnosti da ijednu od tih novih čestica koje predviđa teorija struna istražujemo u laboratoriju.

No, mogli bismo ih istraživati neizravnim pristupima. Na primjer, energije pri nastanku univerzuma bile su dovoljno visoke za nastanak obilja tih čestica. Općenito, ne bismo očekivali da opstanu do danas, jer te superteške čestice iznimno su nestabilne i odbacuju svoju golemu masu raspadajući se redom u sve lakše čestice, te na kraju stvore poznate, relativno lagane čestice u svijetu oko nas. Međutim, moguće je da je neko takvo stanje superteške titrajuće strune – ostatak iz Velikog praska – opstalo do danas. Pronalazak takvih čestica, o čemu opširnije raspravljamo u poglavlju 9, bilo bi, da se blago izrazimo, monumentalno otkriće.

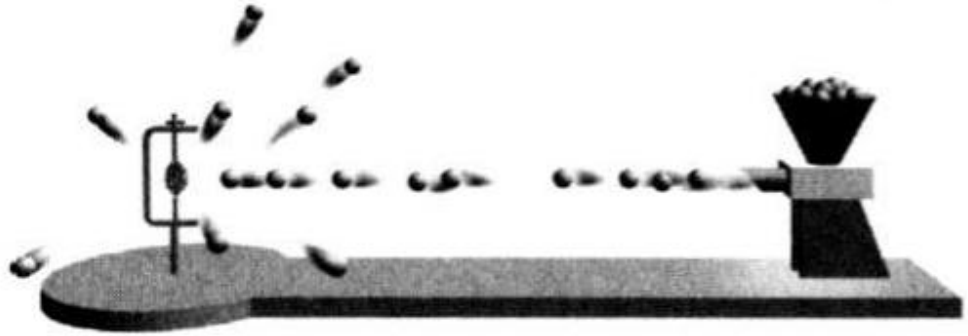
Ujedinjeni okvir koji predstavlja teorija struna izazovan je. No njegova stvarna privlačnost je sposobnost da ublaži neprijateljstva između gravitacijske sile i kvantne mehanike. Prisjetimo se da se problem sa spajanjem opće teorije relativnosti i kvantne mehanike pojavljuje kad se glavni aksiom prve – da prostor i vrijeme čine blago zakrivljenu geometrijsku strukturu – sukobi s bitnim svojstvom druge – da je sve u univerzumu, uključujući i samo tkivo prostora i vremena, podvrgnuto kvantnim fluktuacijama koje postaju sve burnije kad ih se istražuje na sve manjim i manjim redovima veličine. Na udaljenostima manjim od Planckove skale kvantni trzaji tako su siloviti da uništavaju pojam blago zakrivljenog geometrijskog prostora; to znači da se opća teorija relativnosti urušava.

Teorija struna ublažava silovite kvantne titraje "razmazujući" svojstva prostora na tako malim udaljenostima. Postoji

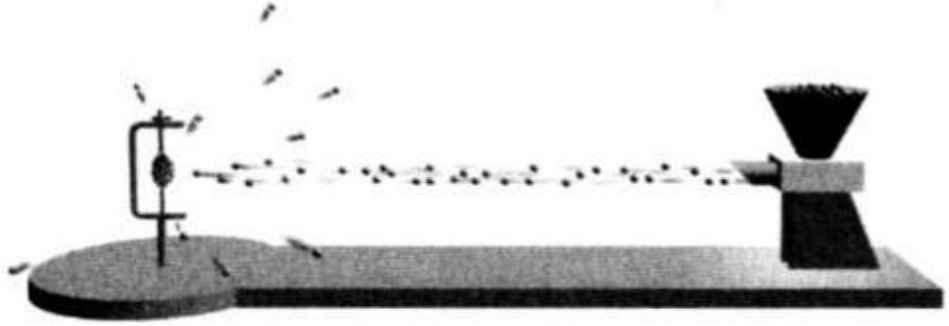
pojednostavljen i precizniji odgovor na pitanje što to doista znači i kako se time rješava sukob. Razmotrit ćemo oba.

Pojednostavljen odgovor

Premda to ne zvuči baš istančano, jedan od načina na koji možemo istraživati strukturu kakva predmeta jest tako da bacamo druge stvari na njega i promatramo kako se točno odbijaju od njega. Na primjer, stvari *vidimo* jer naše oči prikupljaju, a mozak dešifrira informacije koje nose fotoni kad se odbiju od predmeta koji promatramo. Akceleratori čestica temelje se na istom načelu: bacaju komadiće materije kao što su elektroni i protoni jedne na druge, kao i na druge mete, a domišljato konstruirani detektori analiziraju tako nastalo raspršenje kako bi odredili strukturu predmeta o kojima je riječ.



(a)



(b)

(c)

Slika 6.4 Koštica breskve učvršćena je u škripcu i crtamo je samo promatrajući kako se od nje odbijaju stvari – "sonde" – koje bacamo na nju. Služeći se sve manjim sondama – (a) špekulama, (b) petmilimetarskim kuglicama, (c) polumilimetarskim kuglicama – možemo crtati sve detaljnije prikaze.

U pravilu, veličina istraživačke čestice kojom se služimo određuje donju granicu veličine koju možemo mjeriti. Da bismo dobili dojam o tome što znači ta važna tvrdnja, zamislimo da su se Slim i Jim odlučili kulturno uzdizati pa su se upisali na tečaj crtanja. Kako semestar odmiče, Jima počinju sve više smetati Slimove umjetničke vještine i zato ga izaziva na neobičan natječaj. Predlaže da obojica uzmu košticu breskve, stave je u škripac i nacrtaju svoj najpreciznij prikaz "mrtve prirode". Neobičan aspekt Jimovog izazova u tome je što ni on ni Slim neće smjeti gledati koštice. Umjesto toga, obojica će smjeti doznavati podatke o veličini, obliku i svoj-

stvima svoje koštice samo tako što će bacati stvari (ali ne fotone!) na košticu i promatrati kako se odbijaju od nje, kao što je ilustrirano na slici 6.4. Jim kriomice napuni Slimov "top" špekulama (kao na slici 6.4(a) ali svoj top napuni mnogo manjim petmilimetarskim plastičnim kuglicama (kao na slici 6.4(b)). Obojica uključe svoje topove i natjecanje počinje.

Nakon nekog vremena, najbolji crtež koji Slim može načiniti je onaj na slici 6.4(a). Promatrajući putanje odbijenih špekula, uspio je doznati da je koštica malena masa tvrde površine. No, to je sve. Špekule su naprosto prevelike da bi otkrile finu, nabranu strukturu koštice. Kada Slim pogleda Jimov crtež (slika 6.4(b)), s iznenađenjem vidi da ga je Jim nadmašio. Ali, jedan pogled na Jimov top dovoljan je da razotkrije trik: manje istraživačke čestice kojima se poslužio Jim dovoljno su malene da na njihov kut odbijanja utječu neka od najvećih obilježja koje krase površinu ko-

štice. I tako, ispaljujući mnogo petmilimetarskih kuglica i promatrajući njihove putanje nakon odbijanja, Jim je uspio nacrtati detaljniju sliku. Slim ne želi biti poražen i vraća se svom topu, puni ga još manjim istraživačkim česticama – kuglicama od pola milimetra – koje su dovoljno malene da se odbijaju od najfinijih nabora na površini koštice. Promatrajući kako se odbijaju te drske istraživačke čestice, on uspijeva nacrtati pobjednički crtež, prikazan na slici 6.4(c).

Pouka koju treba izvući iz tog malog natjecanja je sljedeća: korisne istraživačke čestice ne mogu biti znatno veće od fizikalnih obilježja koja istražujemo; inače će biti neosjetljive za strukture koje nas zanimaju.

Naravno, ista logika vrijedi i kad želimo još dublje istražiti košticu kako bismo odredili njezinu atomsku i subatomsku strukturu. Polumilimetarske čestice neće nam pružiti nikakve korisne informacije; one su očito prevelike da bi bile imalo osjetljive za atomske razmjere. Zato se akcelera-

tori čestica služe protonima ili elektronima kao sondama, jer su zbog svoje male veličine mnogo prikladniji za tu zadaću. Na subatomskim razmjerima, gdje kvantni pojmovi zamjenjuju klasičnu logiku, najprikladnija mjera istraživačke osjetljivosti čestice je njena kvantna valna duljina, koja označava marginu nesigurnosti njezina položaja. Ta činjenica odraz je naše rasprave o Heisenbergovom načelu neodređenosti u poglavlju 4, u kojem smo zaključili da je margina pogreške do koje dolazi kad se služimo točkastom česticom kao sondom (usredotočili smo se na fotonske sonde ali rasprava vrijedi za sve ostale čestice) otprilike jednaka kvantnoj valnoj duljini istraživačke čestice. Govoreći manje strogo, istraživačka osjetljivost točkaste čestice otupljena je zbog grozničavosti kvantne mehanike, na isti način kao što je preciznost kirurgova skalpela smanjena ako mu se tresu ruke. No prisjetimo se da smo u poglavlju 4 napomenuli i važnu činjenicu da je kvantna valna duljina čestice obrat-

no proporcionalna njenom zaletu, koji je, pojednostavljeno rečeno, njezina energija. I tako se, povećavajući energiju točkaste čestice njezina kvantna valna duljina može sve više skraćivati – kvantno "razmazivanje" može se sve više smanjivati – i stoga se njome možemo služiti za istraživanje sve finijih fizikalnih struktura. Intuitivno gledano, čestice visoke energije imaju veću prodornu moć i stoga su sposobne istražiti manje strukture.

U tom smislu, razlika između točkastih čestica i snopova struna postaje očita. Kao i u slučaju plastičnih kuglica koje sondiraju površinska obilježja breskvine koštice, protežnost koja obilježava strunu sprečava je da istraži strukturu svega što je znatno manje od njezine vlastite veličine – u ovom slučaju, struktura koje nastaju u prostornim razmjerima manjim od Planckove duljine. Govoreći malo preciznije, David Gross, tada na sveučilištu Princeton, i njegov student Paul Mende 1988. godine pokazali su da, kada se uzme u obzir

kvantna mehanika, stalno povećavanje energije strune *ne* povećava stalno njezinu mogućnost da istraži finije strukture, što je u izravnoj suprotnosti onome što se događa s točkastom česticom. Otkrili su da je s povećavanjem energije strune ona isprva sposobna sondirati strukture sve manjih razmjera, upravo poput energijske točkaste čestice. No kad se njena energija poveća iznad vrijednosti potrebne za sondiranje struktura na razmjerima Planckove duljine, dodatna energija ne povećava razlučivost istraživačke strune. Umjesto toga, energija prouzroči *porast* veličine strune, čime *smanji* njenu osjetljivost na malim udaljenostima. Zapravo, premda je veličina tipične strune Planckova duljina, ako u strunu upumpamo dovoljno energije – količinu energije koja nadmašuje i najrazigraniju maštu, ali vjerojatno dosegnutu u velikom prasku – mogli bismo je potaknuti da naraste do *makroskopske* veličine, što bi doista bila neprikladna sonda za mikrokozmos! To je kao da struna, za razliku od točkaste

čestice, gubi razlučivost zbog *dva* uzroka: zbog kvantnih trzaja, kao i kod točkaste čestice, a i zbog vlastitog prostiranja u prostoru. Povećavanjem energije strune smanjuje se "otupljivanje" zbog prvog uzroka, ali se na kraju povećava zbog drugog. Konačan rezultat toga jest da nas, koliko god se trudili, protežnost strune sprečava da njome sondiramo pojave na razmjerima manjim od Planckove duljine.

No, cijeli sukob između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike izvire iz svojstava tkiva prostora na udaljenostima manjim od Planckove duljine. *Ako elementarna sastavnica univerzuma ne može sondirati udaljenosti manje od Planckove skale, onda ni ona ni ništa što je nastalo od nje ne može biti pod utjecajem navodno razornih kvantnih titraja na malim udaljenostima.* To je slično onome što se događa kad rukom dotičemo uglačanu površinu granita. Iako je granit na mikroskopskoj razini diskretan, zrnat i neravan, naši prsti ne mogu napipati te varijacije malih razmjera i površinu osje-

ćaju kao potpuno glatku. Naši debeli, protežni prsti "razmazuju" mikroskopsku diskretnost. Slično tome, budući da struna ima prostornu protežnost, ima i granice svoje osjetljivosti na malim udaljenostima. Ne može detektirati varijacije razmjera manjih od Planckove skale. Poput naših prstiju na granitu, struna "razmazuje" trzave ultramikroskopske fluktuacije gravitacijskog polja. Premda su tako nastale fluktuacije znatne, to razmazivanje ih "uglačava" upravo dovoljno da se razriješi neuskladivost između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. Osim toga, teorija struna rješava one opake beskonačnosti (o kojima smo raspravili u prethodnom poglavlju) koje nastaju kad se kvantna teorija gravitacije pokuša oblikovati na temelju točkastih čestica.

Bitna razlika između analogije s granitom i naših stvarnih briga s tkivom prostora u tome je što *postoje* načini na koje možemo razotkriti mikroskopske razlike: možemo se poslužiti istančanijim, preciznijim sondama. Elektronski

mikroskop ima sposobnost razlučiti površinska obilježja manja od milijuntinke centimetra; to je dovoljno maleno da se otkriju mnoge površinske nesavršenosti. Suprotno tome, u teoriji struna ne postoji način da se otkriju "nesavršenosti" u tkivu prostora na razmjerima manjim od Planckove skale. U univerzumu kojim vladaju zakoni teorije struna, ne vrijedi uobičajeno shvaćanje da uvijek možemo secirati prirodu na sve manjim redovima veličine, bez granica. Granica postoji, i ulazi u igru prije nego što dođemo do razorne kvantne pjene sa slike 5.1. Dakle, u smislu koji ćemo precizirati u kasnijim poglavljima, mogli bismo reći čak i da pretpostavljena kvantna groznica ispod Planckove skale *ne postoji*. Pozitivist bi rekao da nešto postoji samo ako se može – barem u načelu – istražiti i izmjeriti. Budući da bi struna trebala biti najelementarniji objekt u univerzumu i budući da je prevelika da bi na nju utjecalo titranje tkiva prostora u dimenzijama manjim od Planckove duljine, te fluktuacije

ne možemo izmjeriti i stoga, prema teoriji struna, zapravo uopće ne nastaju.

Je li to trik?

Ta rasprava možda vas je razočarala. Umjesto da pokaže kako teorija struna kroti titranje prostora u razmjerima manjim od Planckove duljine, čini se da smo iskoristili veličinu strune, koja je veća od nule, da cijeli taj problem pometemo pod tepih. Jesmo li time išta riješili? Jesmo. To ćemo dokazati u sljedeće dvije tvrdnje.

Prvo, prethodni argument implicira da su navodno problematične fluktuacije prostora u razmjerima manjim od Planckove duljine artefakt formuliranja opće teorije relativnosti i kvantne mehanike u okviru točkastih čestica. Dakle, u nekom smislu, glavni sukob u suvremenoj teorijskoj fizici zapravo je problem koji smo sami stvorili. Budući da smo

prije zamišljali sve materijalne čestice i sve glasničke čestice kao točkaste predmete bez ikakve prostorne protežnosti, morali smo razmatrati svojstva univerzuma na proizvoljno malim udaljenostima. I, na najmanjim udaljenostima naišli smo na naizgled nepremostive probleme. Teorija struna govori nam da smo na te probleme naišli samo zato što nismo razumjeli pravila igre; nova pravila kažu nam da postoji granica preciznosti s kojom možemo sondirati univerzum – i, u stvarnome smislu, granica toga u kojoj se mjeri naš uobičajeni pojam prostora uopće može primijeniti na ultramikroskopsku strukturu kozmosa. Sada se smatra da su pretpostavljene opake prostorne fluktuacije nastale u našim teorijama jer nismo bili svjesni tih granica i stoga nas je pristup s točkastim česticama naveo da grubo prekoračimo granice fizičke stvarnosti.

S obzirom na prividnu jednostavnost tog rješenja za nadilaženje problema između opće teorije relativnosti i kvan-

tne mehanike, možda se pitate zašto je toliko dugo trebalo da netko predloži da je opis s točkastim česticama samo idealizacija i da u stvarnome svijetu elementarne čestice imaju određenu prostornu protežnost. To nas vodi do druge tvrdnje. Neki od najvećih umova u teorijskoj fizici, kao što su Pauli, Heisenberg, Dirac i Feynman, još davno jesu predložili da sastavnice prirode zapravo možda nisu točke nego malene, titrave "kapljice" ili "mrvice". Međutim, i oni i ostali otkrili su da je vrlo teško konstruirati teoriju čija fundamentalna sastavnica nije točkasta čestica, a koja je ipak uskladiva s najosnovnijim fizikalnim načelima kao što su očuvanje kvantnomehaničke vjerojatnosti (tako da fizikalni objekti ne nestanu iznenada iz univerzuma, bez traga) i nemogućnost prijenosa informacije brže od brzine svjetlosti. S raznih gledišta, njihova istraživanja uvijek iznova pokazivala su da se pri odbacivanju paradigme točkastih čestica krši jedno od tih načela ili oba. Stoga se dugo činilo nemogućim pronaći razumnu kvantnu teoriju koja bi se zasnivala na ne-

čemu drugom osim točkastih čestica. Uistinu impresivno svojstvo teorije struna jest to što je više od dvadeset godina egzaktnih istraživanja pokazalo da, iako su neka njena obilježja neobična, teorija struna poštuje sva nužna svojstva koja su potrebna za svaku razumnu fizikalnu teoriju. Štoviše, svojim gravitonskim modelom titranja teorija struna postaje kvantna teorija koja uključuje gravitaciju.

Precizniji odgovor

Pojednostavljeni odgovor izražava bit razloga zašto teorija struna prevladava ondje gdje su starije teorije točkastih čestica doživjele neuspjeh. I tako, ako želite, možete prijeći na sljedeći odjeljak a da ne izgubite logičku nit izlaganja. U poglavlju 2 razvili smo bitne ideje specijalne teorije relativnosti i već imamo sredstva nužna za preciznije opisivanje kako teorija struna umiruje silovite kvantne trzaje.

Slika 6.5 Dvije čestice u interakciji – "sudare se" i mijenjaju putanju jedna drugoj.

U preciznijem odgovoru oslanjamo se na istu osnovnu ideju kao i u pojednostavljenom odgovoru, ali izražavamo ga izravno na razini struna. To činimo detaljnom usporedbom točkastih čestica i struna u ulozi sondi. Vidjet ćemo kako protežnost strune zamućuje informacije koje bi se mogle dobiti sondiranjem točkastim česticama, te stoga i još jedanput kako ona lako razrješava ponašanje na ultrakratkim udaljenostima kao glavni problem suvremene fizike.

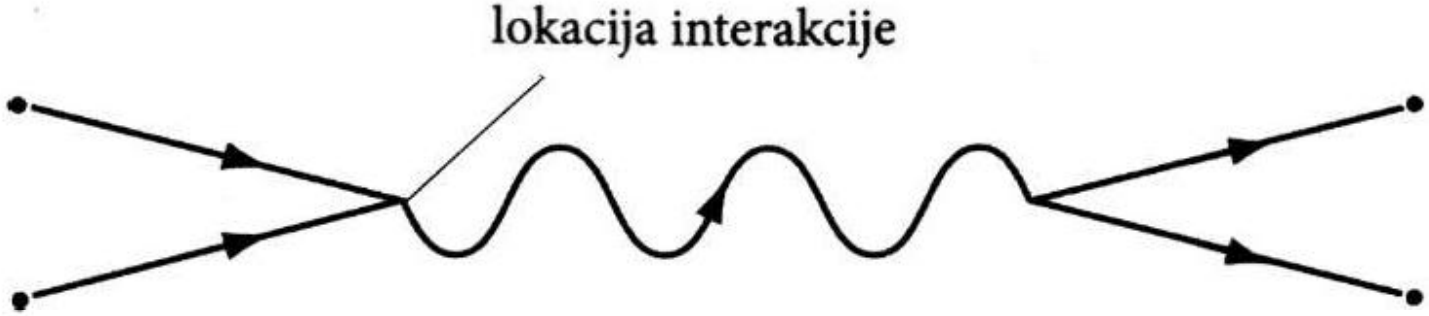
Prvo ćemo razmotriti način na koji bi točkaste čestice stupale u interakcije, kad bi uistinu postojale, te kako bi sto-

ga mogle poslužiti kao fizikalne sonde. Najosnovnija interakcija je ona između dviju točkastih čestica koje se moraju sudariti jer im se putanje presijecaju, kao na slici 6.5. Kad bi te čestice bile bilijarske kugle, sudarile bi se i krenule novom putanjom. Kvantna teorija polja točkaste čestice pokazuje da se pri sudaru elementarnih čestica u biti događa isto – odbiju se jedna od druge i nastave se gibati drukčijom putanjom – ali pojedinosti su ponešto drukčije.

Radi konkretnosti i jednostavnosti, zamislimo da je jedna od tih čestica elektron, a druga je njegova antičestica, pozitron. Kad se sudare materija i antimaterija, one se mogu poništiti u bljesku čiste energije i proizvesti, na primjer, foton.[9] Da bismo razlikovali novu putanju fotona od prethodnih putanja elektrona i pozitrona, slijedimo tradicionalnu fizikalnu konvenciju i crtamo je vijugavom linijom. Foton

---

[9] Stručan čitatelj znat će da je foton koji nastaje u sudaru elektrona i pozitrona virtualni foton i stoga mora brzo vratiti svoju energiju disocirajući se u par čestica-antičestica.



Slika 6.6 U kvantnoj teoriji polja se čestica i njezina antičestica trenutno anihiliraju te pritom stvore foton. Taj foton nakon toga može stvoriti drugu česticu i antičesticu koje putuju drukčijim putanjama.

će obično putovati neko vrijeme i potom osloboditi energiju dobivenu od početnog para elektron-pozitron tako što će stvoriti drugi par elektron-pozitron, s putanjama naznačenim desno na slici 6.6. Na kraju, dvije čestice se ispale jedna na drugu, stupe u interakciju preko elektromagnetske sile i na kraju krenu skrenutim putanjama: taj niz događaja ima nekih sličnosti s našim opisom sudara bilijarskih kugli.

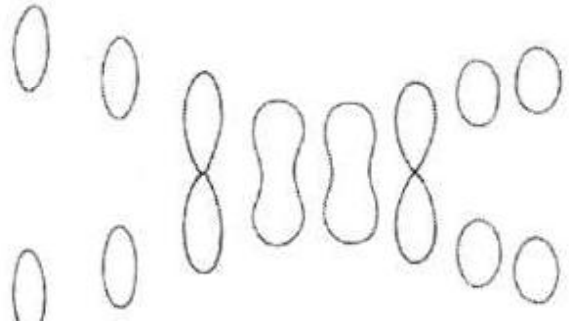
Zanimaju nas pojedinosti te interakcije – konkretno, točka gdje se početni elektron i pozitron anihiliraju i stvaraju

foton. Kao što će nam postati očito, glavna činjenica je to što postoji nedvosmisleno, potpuno odredivo vrijeme i mjesto gdje se to događa. Označeno je na slici 6.6.

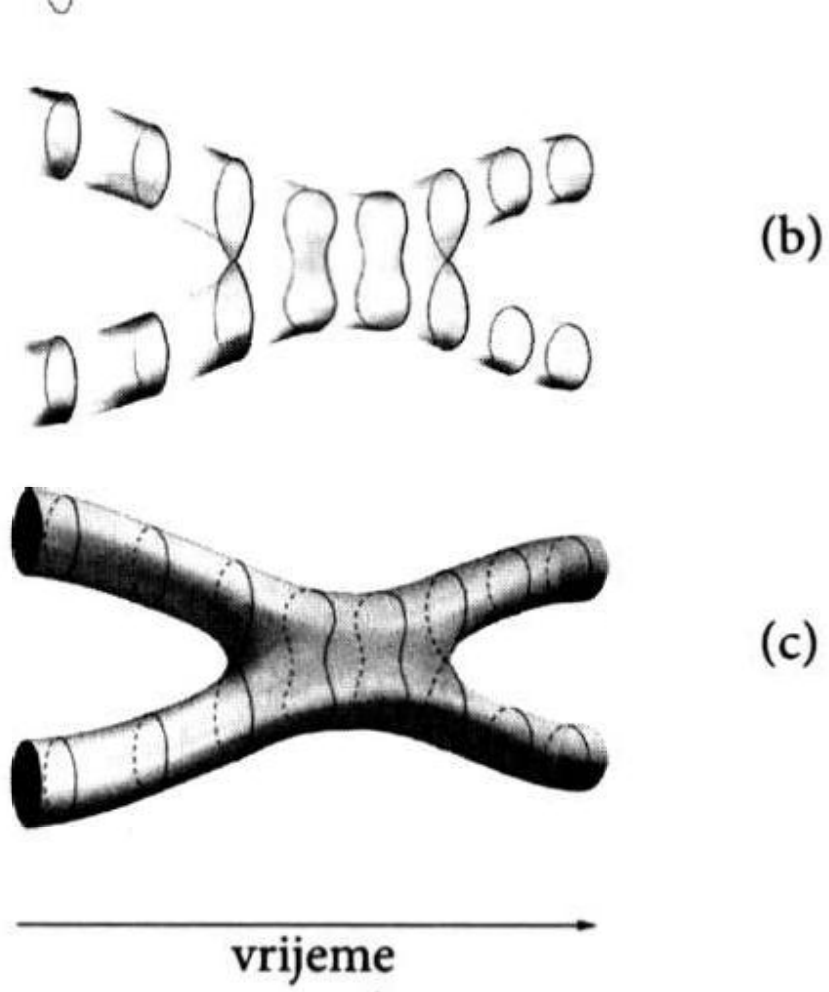
Kako se taj opis mijenja ako se, kad izbliza pogledamo objekte koje smo smatrali jednodimenzionalnim točkama, pokaže da su oni jednodimenzionalne strune? Osnovni proces interakcije je jednak, ali sada su objekti na putanji sudara titrajuće petlje, kao što se vidi na slici 6.7. Ako te petlje titraju na odgovarajući rezonantan način, odgovarat će elektronu i pozitronu na putanji sudara, kao na slici 6.6. Njihov karakter strune postaje očit tek kad ih se pogleda na najmanjem redu veličine, daleko manjem nego što nam to može omogućiti današnja tehnologija. Kao i u slučaju s točkastim česticama, dvije strune se sudare i anihiliraju u bljesku. Taj bljesak, foton, i sam je struna koja titra na poseban način. Dakle, dvije dolazeće strune stupaju u interakciju tako što se stapaju i stvore treću strunu, prikazanu na slici 6.7. Kao i u opisu s točkastim česticama, ta struna neko vrijeme putuje,

a potom ispusti energiju dobivenu od dviju početnih struna tako što se razdvoji na dvije strune koje dalje putuju. Da ponovimo: iz svake perspektive osim mikroskopske, to će izgledati upravo kao interakcija točkastih čestica na slici 6.6.

No, ta dva opisa ipak se bitno razlikuju. Naglasili smo da se interakcija između točkastih čestica događa na odredivom mjestu u prostoru i vremenu, na lokaciji o kojoj se svi promatrači mogu složiti. Kao što ćemo vidjeti, to nije istina za interakcije između struna. To ćemo pokazati usporedivši kako bi tu interakciju opisali George i Gracie, dvoje promatrača u relativnom gibanju kao u poglavlju 2. Vidjet ćemo da se ne slažu u vezi s tim gdje i kada se dvije strune prvi put dotaknu.



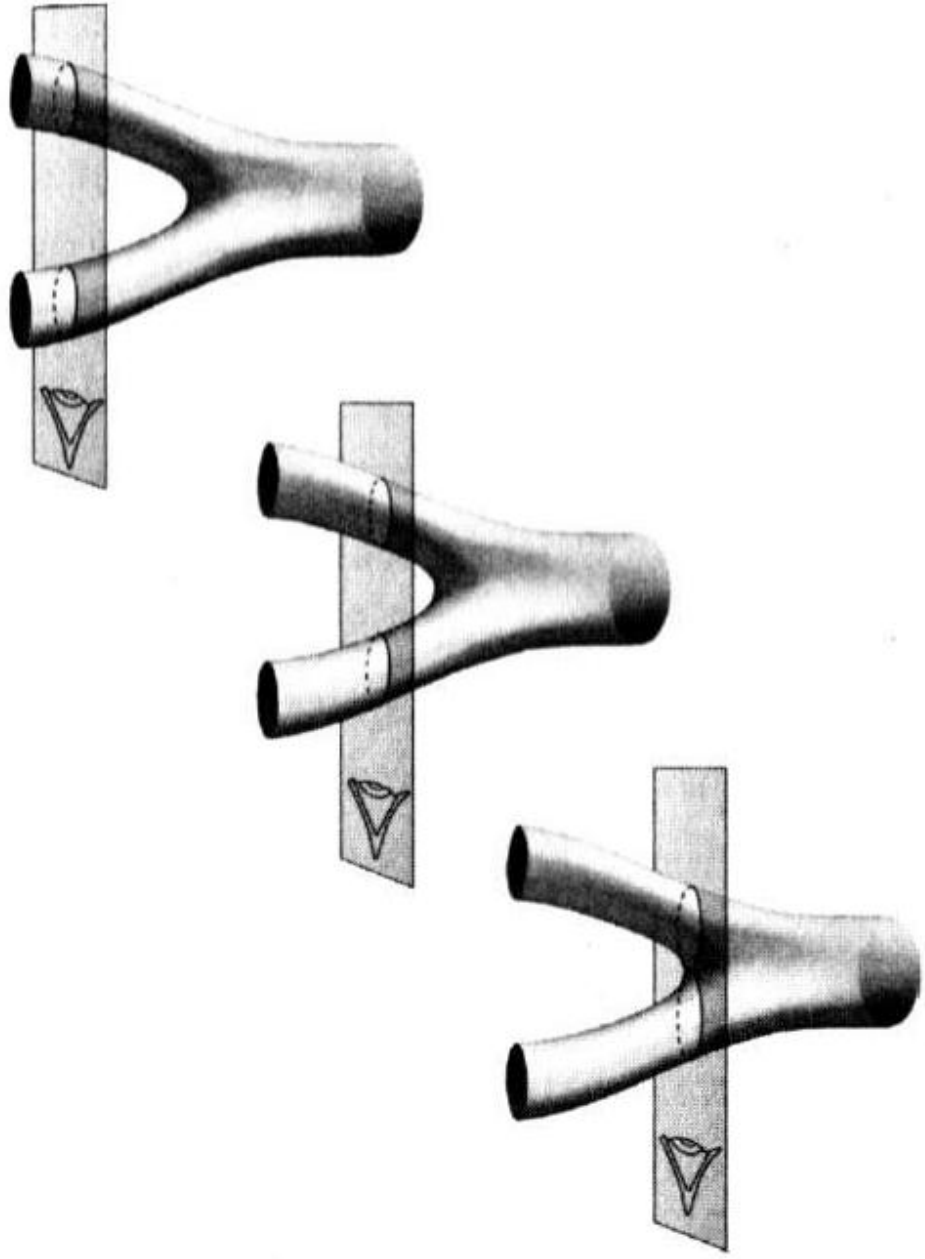
(a)



Slika 6.7 (a) Dvije strune mogu se stopiti u treću strunu, koja se potom može razdvojiti na dvije strune koje dalje putuju skrenutim putanjama. (b) Isti proces kao onaj prikazan na (a), s naglaskom na gibanju struna. (c) "Usporeni film" dviju struna u interakciji koji iscrtava "svjetsku površinu".

Da bismo to učinili, zamislimo da promatramo interakciju između dviju struna kamerom čiji zatvarač ostaje otvoren tako da cijela povijest tog procesa ostaje zabilježena na jednom filmskom negativu.[10] Rezultat – poznat kao *svjetska površina strune* – prikazujemo na slici 6.7(c). "Režući" svjetsku površinu na paralelne prereze – kao što režemo kruh na kriške – može se pregledati povijest interakcije struna iz trenutka u trenutak. Primjer takvih prereza prikazujemo na slici 6.8. Konkretno, na slici 6.8(a) prikazujemo Georgea, usredotočenog na dvije dolazeće strune, uz ravninu koja je prerez *svih događaja u prostoru koji se dogode u isto vrijeme*, s njegovog gledišta. Kao što smo učinili u prethodnim poglavljima, i na ovom dijagramu potisnuli smo jednu prostornu dimenziju radi vizualne jasnoće. Naravno, u stvarnosti postoji trodimenzionalno polje događaja koji se dogode u isto vrijeme, s gledišta jednog promatrača. Slike 6.8(b) i 6.8(c) daju dvije snimke dvaju susljednih trenutaka – su-

10 Naravno, kamera radi tako što prikuplja fotone koji se odbijaju od predmeta koji nas zanima i bilježi ih na komadu fotografskog filma. Mi se u ovom primjeru kamerom služimo simbolički jer ne zamišljamo da se fotoni odbijaju od struna u sudaru. Samo želimo na slici 6.7 zabilježiti cijelu povijest interakcije. S obzirom na to, trebalo bismo istaknuti još jednu finu pojedinost koju smo u tekstu zanemarili. U poglavlju 4 doznali smo da kvantnu mehaniku možemo formulirati Feynmanovom metodom zbroja svih putanja, u kojoj analiziramo gibanje predmeta kombinacijom *svih* mogućih putanja koje vode od nekog odabranog polazišta do odabranog odredišta (pri čemu svaka putanja pridonosi statističkom težinom koju je odredio Feynman). Na slikama 6.6 i 6.7 prikazujemo *jednu* od beskonačnog broja mogućih putanja koje slijede točkaste čestice (slika 6.6) ili strune (slika 6.7) koje ih vode od polazišta do odredišta. No rasprava u ovom odjeljku ipak jednako vrijedi za svaku drugu moguću putanju i stoga vrijedi i za cijeli kvantnomehanički proces. (Feynmanova formulacija kvantne mehanike točkastih čestica u okviru zbroja putanja generalizirana je u teoriji struna radom Stanleyja Mandelstama s Kalifornijskog sveučilišta u Berkeleyju i ruskog fizičara Aleksandra Poljakova, koji danas rade u fizikalnom odsjeku Princetonskog sveučilišta.)



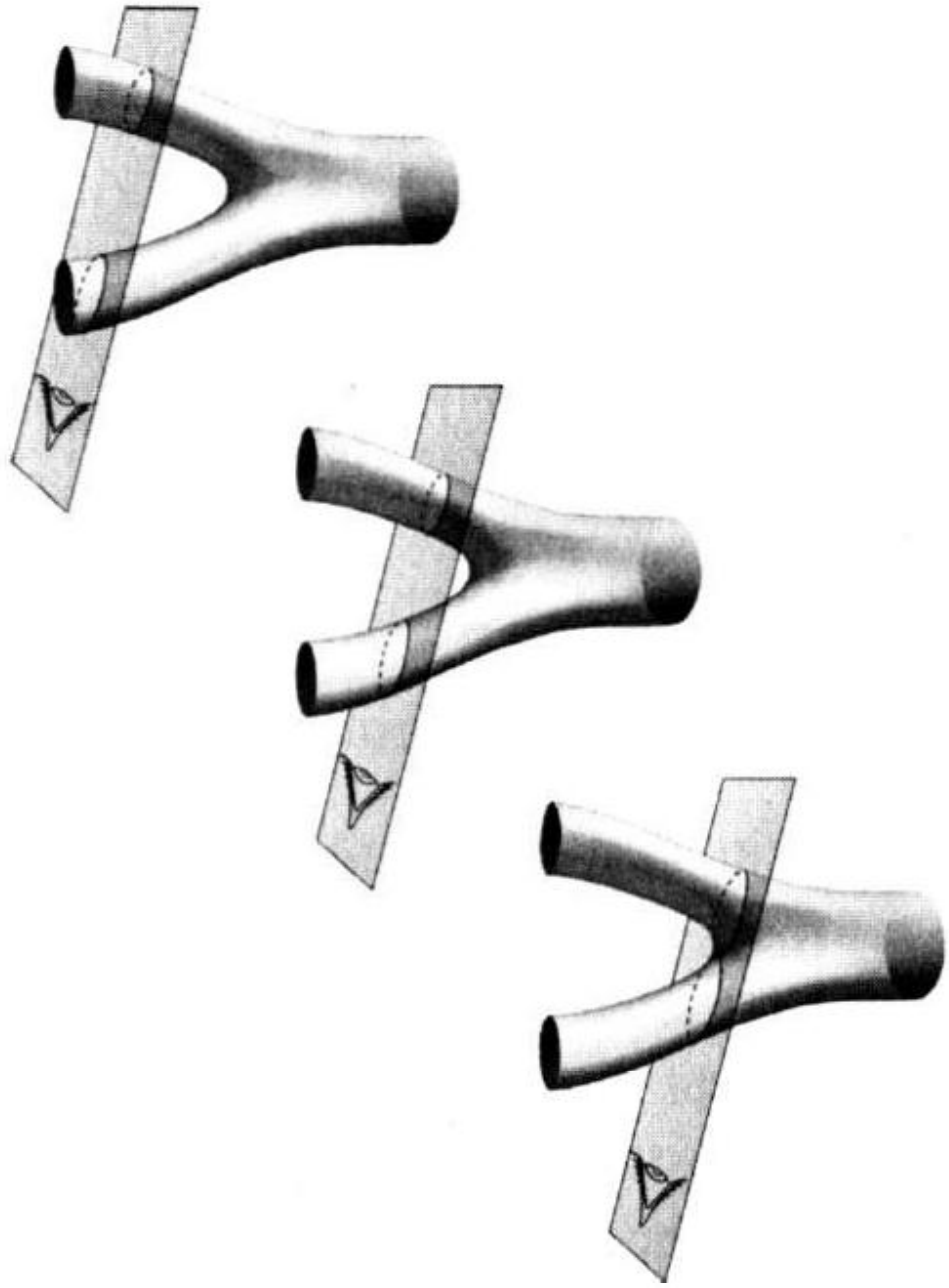
Slika 6.8 Dvije dolazeće strune iz Georgeove perspektive u tri su

Slika 6.8 Dvije dolazeće strune iz Georgeove perspektive u tri susljedna trenutka. U (a) i (b) strune se približavaju; u (c) se prvi put dotaknu, s njegovog gledišta.

sljednih "prereza" svjetske površine – i prikazuju kako George vidi dvije strune koje se približavaju jedna drugoj. Na slici 6.8(c) najvažniji je trenutak u kojemu se, prema Georgeu, dvije strune prvi put dotaknu i stope se te stvore treću strunu.

Učinimo sada isto za Gracie. Kao što smo raspravili u poglavlju 2, relativno gibanje Georgea i Gracie implicira da se oni ne slažu o tome koji se događaji dogode u isto vrijeme. Iz Graciene perspektive, događaji u prostoru koji se događaju istovremeno leže na drukčijoj ravnini, kao što se vidi na slici 6.9. Naime, iz Graciene perspektive, svjetsku površinu na slici 6.7(c) mora se "razrezati" na kriške pod drukčijim kutom kako bi se pokazao tijek interakcije iz trenutka u trenutak.

Na slikama 6.9(b) i 6.9(c) prikazujemo susljedne trenutke, sada iz Graciene perspektive, uključujući trenutak kad

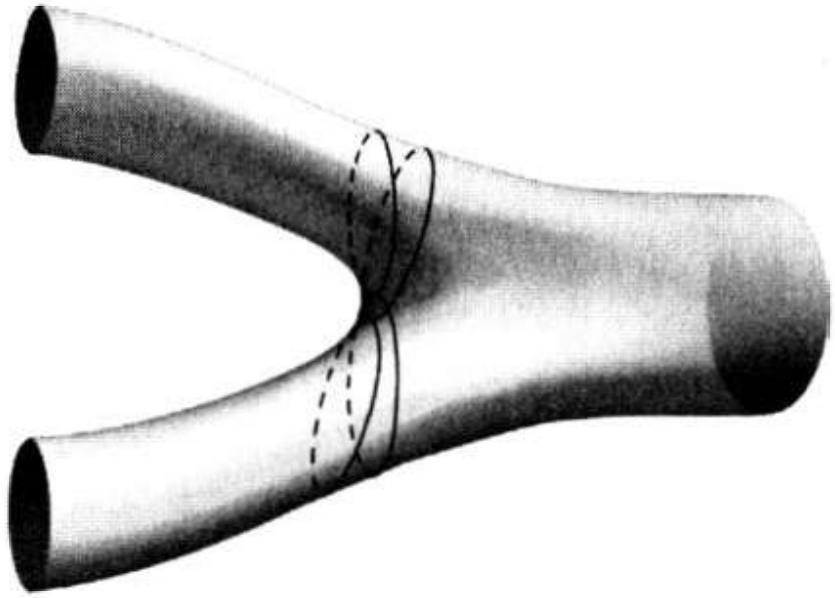


Slika 6.9 Dvije dolazeće strune iz Graciene perspektive u tri susljedna trenutka. U (a) i (b) strune se približavaju; u (c) se prvi put dotaknu, iz njene perspektive.

ona ugleda kako se dvije dolazeće strune dotaknu i stvore treću strunu.

Usporedivši slike 6.8(c) i 6.9(c), kao što činimo na slici 6.10, vidimo da se George i Gracie ne slažu u vezi s tim kada i gdje se dotaknu dvije početne strune – gdje stupe u interakciju. Budući da je struna protežni objekt, *ne postoji nedvosmislena lokacija ni trenutak u kojemu strune prvi put stupe u interakciju* – umjesto toga, to ovisi o gibanju promatrača.

Ako posve istu logiku primijenimo na interakciju točkastih čestica, kao što smo prikazali na slici 6.1, dolazimo do istog zaključka koji smo već ranije iznijeli – postoji točno određena točka (u prostoru) i trenutak (u vremenu) kad točkaste čestice stupaju u interakciju. Točkaste čestice strpaju cjelokupnu interakciju u točno određenu točku. Kad je sila koja je uključena u interakciju gravitacijska sila – to



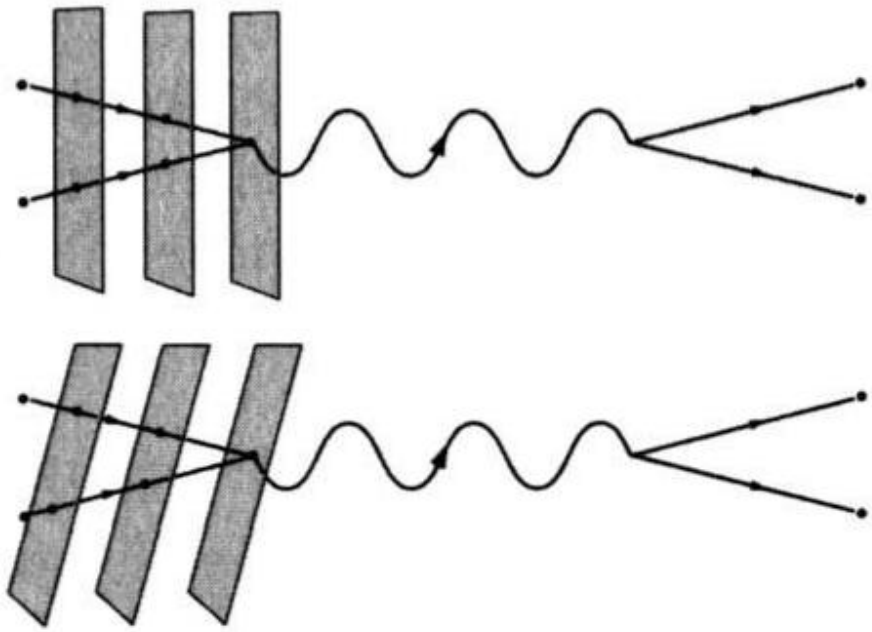
Slika 6.10 George i Gracie ne slažu se u vezi s lokacijom interakcije.

jest, kad je glasnička čestica uključena u interakciju graviton umjesto fotona – to kompletno pakovanje udarne snage sile vodi do katastrofalnih rezultata, poput beskonačnih rješenja koje smo već spominjali. Suprotno tome, strune "razmažu" mjesto na kojem se dogodi interakcija. Budući da različiti promatrači opažaju da se interakcija događa na različitim lokacijama uzduž lijevog dijela površine slike

6.10, to u stvarnom smislu znači da je lokacija interakcije rasprostrta po svima njima. To rasprostire udar sile i, u slučaju gravitacijske sile, to širenje znatno oslabljuje njezina ultramikroskopska svojstva – u toj mjeri da izračuni daju dobro odmjerene, konačne odgovore umjesto prethodnih, beskonačnih. To je preciznija verzija raspršivanja u pojednostavljenom odgovoru u prethodnom odjeljku. I još jedanput, to raspršivanje rezultira ublažavanjem ultramikroskopskih titraja prostora jer se udaljenosti manje od Planckove duljine stapaju jedna u drugu.

Promatrači u relativnom gibanju slažu se u vezi s tim gdje i kada dvije točkaste čestice stupaju u međusobnu interakciju.

Poput promatranja svijeta kroz preslabe ili prejake naočale, istančani sub-planckovski detalji koji bi bili dostupni sondiranju točkaste čestice u teoriji struna su raspršeni i postaju bezopasni. I za razliku od slabog vida, ako je teorija struna konačan opis univerzuma, ne postoje nikakve naoča-



Slika 6.11 Ista lokacija interakcije

le koje bi izoštrile pretpostavljene sub-planckovske fluktuacije. Neuskladivost opće teorije relativnosti i kvantne mehanike – koja bi postala očita tek na udaljenostima manjim od Planckove duljine – izbjegava se u univerzumu koji ima donju granicu udaljenosti do kojih se može doprijeti, ili uopće reći da postoje u uobičajenom smislu. Takav je univerzum kako ga opisuje teorija struna, univerzum u kojem vidimo

da se zakoni velikoga i malenoga mogu skladno stopiti kako bi se jednim potezom spriječila pretpostavljena katastrofa koja nastaje na ultramikroskopskim udaljenostima.

Ispod struna?

Strune su posebne zbog dvaju razloga. Prvo, iako se prostorno rasprostiru, može ih se konzistentno opisati u okviru kvantne mehanike. Drugo, među rezonantnim obrascima titranja postoji jedan koji ima svojstva gravitona i tako ugrađuje gravitacijsku silu kao integralan dio strukture teorije. No upravo kao što teorija struna pokazuje da je uobičajeni pojam točkaste čestice bez dimenzija i matematička idealizacija koja se ne ostvaruje u stvarnome svijetu, zar ne bi moglo biti da je i beskrajno tanka, jednodimenzionalna struna također matematička idealizacija? Zar ne bi moglo biti da strune zapravo imaju debljinu – poput površine dvodimen-

zionalne unutrašnje biciklističke gume, ili, još realističnije, poput tankog trodimenzionalnog uštipka? Naizgled nepremostive prepreke na koje su naišli Heisenberg, Dirac i drugi u pokušajima da konstruiraju kvantnu teoriju trodimenzionalnih elementarnih čestica uvijek iznova sputavaju istraživače koji slijede tu prirodnu logiku.

No, posve neočekivano, sredinom 1990-ih su teoretičari struna, služeći se neizravnom i prilično lukavom logikom, shvatili da ti višedimenzionalni fundamentalni objekti doista igraju važnu i istančanu ulogu u samoj teoriji struna. Istraživači su postupno shvaćali da teorija struna ne sadrži *samo* strune. Presudno opažanje, važno za drugu revoluciju superstruna koju su 1995. pokrenuli Witten i drugi, glasi da teorija struna zapravo uključuje elemente raznolikih dimenzija: dvodimenzionalne konstituente nalik na frizbi, trodimenzionalne nalik na kapljice, i još egzotičnije mogućnosti. Te, najnovije spoznaje pregledat ćemo u poglavljima 12 i 13. Zasad nastavljamo s povijesnim pregledom i dalje

istražujemo nova, iznenađujuća svojstva univerzuma izgrađenog od jednodimenzionalnih struna umjesto točkastih čestica bez dimenzija.

SEDMO POGLAVLJE

"Super" u superstrunama

Kad je postalo jasno da je Eddingtonova ekspedicija 1919. uspjela izmjeriti Einsteinovo predviđanje o savijanju svjetlosti pri prolasku pokraj sunca, nizozemski fizičar Hendrik Lorentz poslao je Einsteinu telegram s dobrim vijestima. Kad se vijest o toj telegramskoj potvrdi proširila, neki student upitao je Einsteina što bi mislio da Eddingtonov ekspe-

riment nije našao predviđeno savijanje zvjezdane svjetlosti. "Tada bi mi bilo žao dragog lorda, jer teorija je ispravna",[1] odgovorio je Einstein. Naravno, da eksperimenti doista nisu uspjeli potvrditi Einsteinova predviđanja, teorija ne bi bila ispravna i opća teorija relativnosti ne bi postala stup moderne fizike. No Einstein je želio reći da opća teorija relativnosti opisuje gravitaciju s tako dubokom elegancijom, tako jednostavnim ali snažnim idejama, da mu je bilo teško zamisliti kako bi je priroda mogla odbaciti. Po Einsteinovu mišljenju, opća teorija relativnosti odviše je lijepa da bi bila pogrešna.

Međutim, estetske ocjene ne vladaju znanstvenim diskursom. Teorije se procjenjuje po tome kako se nose s hladnim, tvrdim, eksperimentalnim činjenicama. No, tu tvrdnju treba pojasniti veoma važnim ograničenjem. Dok se teorija

---

[1] Albert Einstein, citiran u: R. Clark, *Einstein: The Life and Times* (New York: Avon Books, 1984), str. 287.

gradi, njezina nedovršenost često sprečava detaljnu procjenu njezinih eksperimentalnih posljedica. No ipak, fizičari moraju donositi odluke i prosudbe o kako će usmjeriti istraživanja svoje djelomično dovršene teorije. Neke od tih odluka određuje potreba za unutarnjom logičkom dosljednošću; svakako zahtijevamo da svaka razumna teorija mora izbjegavati logičke apsurde. Druge odluke donose se na temelju kvalitativnih eksperimentalnih implikacija koje ima jedan teorijski konstrukt u odnosu na drugi; obično nas ne zanima teorija ako ona ne nalikuje ničemu na što nailazimo u svijetu oko nas. No, svakako je točno i da se neke odluke teorijskih fizičara temelje na estetskom osjećaju – dojmu da se elegancija i ljepota strukture mogu mjeriti s onima u stvarnom svijetu. Naravno, nema dokaza da ta strategija nužno vodi prema istini. Možda univerzum u svojoj dubini ima manje elegantnu strukturu nego što nas naša iskustva navode da vjerujemo, a možda naše estetske kriterije treba znatno doraditi kad ih pokušavamo primijeniti u manje

poznatom kontekstu. No ipak, posebno zato što ulazimo u doba kad naše teorije opisuju područja univerzuma koja je sve teže ispitati eksperimentima, fizičari se oslanjaju na estetiku kako bi im pomogla da ne zađu u slijepe ulice kojima bi inače krenuli. To načelo zasad se pokazuje kao mudra ideja vodilja.

Kao i u umjetnosti, u fizici je simetrija ključan dio estetike. No, za razliku od umjetnosti, u fizici simetrija ima konkretno i precizno značenje. Zapravo, marljivo dovodeći taj precizan pojam simetrije do njegova matematičkog zaključka, fizičari su posljednjih nekoliko desetljeća došli do teorija u kojima su materijalne i glasničke čestice mnogo jače isprepletene nego što je itko naslućivao. Te teorije, koje ujedinjuju ne samo prirodne sile nego i materijalne sastavnice, imaju najveću moguću simetriju i stoga ih nazivamo *supersimetričnima*. Kao što ćemo vidjeti, teorija superstruna je i izvor i vrhovni primjer supersimetričnog okvira.

Zamislimo univerzum u kojemu su zakoni fizike efemerni poput mode – mijenjaju se iz godine u godinu, iz tjedna u tjedan, ili čak iz trenutka u trenutak. U takvom svijetu, pod pretpostavkom da promjene ne remete osnovne životne procese, nikad vam ne bi bilo dosadno, da se blago izrazimo. I najjednostavniji činovi bili bi pustolovine, jer bi vas nasumične varijacije spriječile da se poslužite stečenim iskustvom kako biste predvidjeli buduće ishode.

Takav univerzum je noćna mora fizičara. Fizičari – kao i većina nas – oslanjaju se na stabilnost univerzuma. Zakoni koji su istiniti danas bili su istiniti i jučer, a bit će i sutra (čak i ako nismo bili dovoljno pametni da ih sve dokučimo). Uostalom, što bi uopće značio "zakon" kad bi se mogao naglo mijenjati? To ne znači da je univerzum statičan; zasigurno se mijenja na nebrojene načine, iz trenutka u trenutak. To znači da su zakoni koji vladaju tim razvojem fiksirani i nepro-

mjenjivi. Mogli biste postaviti pitanje znamo li doista da je to istina. Zapravo, ne znamo. ali naš uspjeh u opisivanju brojnih svojstava univerzuma, od kratkog trenutka poslije velikog praska do sadašnjosti, uvjerava nas da se zakoni ne mijenjaju, ili to čine vrlo polako. Najjednostavnije objašnjenje glasi da su nepromjenjivi zakoni u skladu sa svime što znamo.

Sada zamislimo univerzum u kojem su zakoni fizike provincijalni poput lokalne kulture – mijenjaju se nepredvidljivo od mjesta do mjesta i tvrdoglavo odbacuju svaki vanjski utjecaj. Poput Gulliverovih pustolovina, putovanja u takvom svijetu izložila bi vas nevjerojatno bogatom rasponu nepredvidljivih iskustava. No, iz fizičareve perspektive, to je još jedna noćna mora. Već je dovoljno teško podnijeti to što zakoni koji vrijede u jednoj zemlji – ili samo jednoj pokrajini – možda ne vrijede u drugoj. Zamislite kako bi bilo kad bi *prirodni* zakoni bili tako promjenjivi. U takvom svijetu, eksperimenti izvedeni na jednom mjestu ne bi se odnosili

na zakone fizike koji su relevantni negdje drugdje. Umjesto toga, fizičari bi morali uvijek iznova ponavljati eksperimente na različitim mjestima kako bi istražili koji prirodni zakoni gdje vrijede. Srećom, sve što znamo upućuje na to da su zakoni fizike posvuda isti. Svi eksperimenti na svijetu kreću se prema istom sklopu osnovnih fizikalnih objašnjenja. Štoviše, naša sposobnost da objasnimo golem broj astrofizičkih opažanja dalekih svemirskih prostora služeći se jednim, fiksiranim sklopom fizikalnih načela navodi nas na vjerovanje da isti zakoni *doista* vrijede posvuda. Kako nismo otputovali na drugi kraj univerzuma, ne možemo definitivno isključiti mogućnost da drugdje vlada neka posve drukčija fizika, ali sve upućuje na suprotno.

No, to ne znači da svemir izgleda jednako – ili ima posve ista obilježja – na drugim mjestima. Astronaut koji skakuće na Mjesecu može činiti koješta što nije moguće na Zemlji. No mi znamo da razlike nastaju zbog toga što je Mjesec mnogo manje masivan od Zemlje; to ne znači da se zakon

gravitacije nekako mijenja od mjesta do mjesta. Newtonov, ili preciznije rečeno, Einsteinov zakon gravitacije isti je i na Zemlji i na Mjesecu. Razlika u astronautovom iskustvu izvire iz promjene okoliša, a ne iz promjene fizikalnog zakona.

Ta dva obilježja zakona fizike – da oni ne ovise o tome kada i gdje ih primjenjujete – fizičari nazivaju *simetrijama* prirode. Time fizičari žele reći da priroda svaki trenutak u vremenu i prostoru tretira na jednak način – simetrično – i osigurava da djeluju isti fundamentalni zakoni. Gotovo na isti način kao što djeluju u slikarstvu i glazbi, te simetrije veoma su svrhovite; one ističu poredak i dosljednost u mehanizmima prirode. Elegancija bogatih, složenih i raznolikih pojava koje izviru iz jednostavnog sklopa općih zakona barem je dio onoga što fizičari žele reći kad kažu "lijepo".

U svojim izlaganjima o specijalnoj i općoj teoriji relativnosti naišli smo na još neke simetrije prirode. Prisjetimo se da načelo relativnosti, koje je u osnovi specijalne teori-

je relativnosti, kaže da svi fizikalni zakoni moraju biti isti bez obzira na relativno gibanje stalnom brzinom, u kojemu mogu biti pojedini promatrači. To je simetrija jer to znači da priroda jednako tretira sve takve promatrače – simetrično. Svaki takav promatrač opravdano smatra da miruje. Ponovno naglašavamo da neće svi promatrači u relativnom gibanju obavljati jednaka opažanja; kao što smo vidjeli ranije, u njihovim opažanjima ima svakojakih iznenađujućih razlika. Poput različitih iskustava skakutavog astronauta na Zemlji i na Mjesecu, razlike u opažanjima odraz su pojedinosti u okolišu – toga što su promatrači u relativnom gibanju – iako njihovim opažanjima vladaju isti *zakoni*.

Načelom ekvivalencije ili opće relativnosti Einstein je znatno proširio tu simetriju tako što je pokazao da su zakoni fizike doista isti za sve promatrače, čak i kad su oni u složenom, ubrzanom gibanju. Prisjetimo se da je to Einstein postigao shvativši da ubrzavani promatrač posve opravdano može reći da miruje i da je sila koju osjeća prouzročena

gravitacijskim poljem. Kad se u okvir uključi gravitacija, sva moguća gledišta postaju ravnopravna. Osim unutarnje estetske privlačnosti tog egalitarizma u gibanju, vidjeli smo i da ti principi simetrije imaju glavnu ulogu u iznenađujućim zaključcima o gravitaciji do kojih je došao Einstein.

Postoje li neki drugi principi simetrije, koji se odnose na prostor, vrijeme i gibanje, a zakoni prirode ih moraju poštovati? Ako malo razmislite o tome, možda ćete se dosjetiti još jedne mogućnosti. Zakoni fizike ne bi se trebali obazirati na *kut* pod kojim obavljate promatranja. Na primjer, ako izvedete neki eksperiment i potom odlučite rotirati svoju opremu i ponoviti ga, morali bi vrijediti isti zakoni. To je poznato kao rotacijska simetrija i znači da su prema zakonima fizike sve moguće *orijentacije* ravnopravne. To je princip simetrije ravnopravan prethodnima koje smo raspravili.

Ima li i drugih? Jesmo li previdjeli neke simetrije? Mogli biste sugerirati baždarne simetrije, povezane s negravitacij-

skim silama, što smo raspravili u poglavlju 5. To su u svakom slučaju simetrije prirode, ali su apstraktnije vrste; ovdje govorimo o simetrijama koje se izravno odnose na prostor, vrijeme ili gibanje. S obzirom na to, sada je vjerojatno da se ne možete dosjetiti nijedne druge mogućnosti. Zapravo, 1967. godine su fizičari Sidney Coleman i Jeffrey Mandula uspjeli dokazati da se nijedna simetrija povezana s prostorom, vremenom i gibanjem ne može kombinirati s onima koje smo spomenuli a da pritom nastane teorija koja bi imala ikakve sličnosti s našim svijetom.

No, nakon podrobne analize tog teorema, zasnovanog na spoznajama velikog broja fizičara, otkrivena je upravo jedna sićušna rupa: rezultat Colemana i Mandule nije u punoj mjeri iskoristio simetrije koje se odnose na svojstvo poznato kao *spin*.

Spin

Elementarna čestica poput elektrona može orbitirati oko atomske jezgre na donekle sličan način kao što Zemlja orbitira oko Sunca. No, u tradicionalnom opisu elektrona kao točkaste čestice činilo bi se da nema analogije Zemljinoj vrtnji oko svoje osi. Kad se objekt vrti, točke na osi rotacije – poput središta vrtećeg frizbija – ne miču se. No ako je nešto uistinu točkasto, ono nema "drugih točaka" koje bi ležale izvan navodne osi rotacije. I tako bi se činilo da jednostavno ne postoji pojam vrtnje točkastog objekta. Još prije mnogo godina, tu logiku srušilo je još jedno kvantnomehaničko iznenađenje.

Nizozemski fizičari George Uhlenbeck i Samuel Goudsmit shvatili su da se obilje zagonetnih podataka koji se odnose na svojstva svjetlosti koju atomi emitiraju i apsorbiraju može objasniti ako se pretpostavi da elektroni imaju vrlo osobita *magnetska* svojstva. Stotinjak godina prije toga,

Francuz André-Marie Ampère dokazao je da magnetizam nastaje gibanjem električnog naboja. Uhlenbeck i Goudsmit krenuli su tim putem i otkrili da bi samo jedna, posebna vrsta gibanja elektrona mogla stvoriti magnetska svojstva koja podaci sugeriraju: rotacijsko gibanje, vrtnja – to jest, *spin*. Suprotno klasičnim očekivanjima, Uhlenbeck i Goudsmit objavili su da se, donekle poput Zemlje, i elektroni vrte oko jezgre i *oko sebe*.

Jesu li Uhlenbeck i Goudsmit doslovno mislili da se elektron vrti? I jesu i nisu. Njihov rad doista je dokazao da postoji kvantnomehanički pojam spina koji je donekle sličan uobičajenoj slici vrtnje ali je kvantnomehaničke prirode. To je jedno od onih svojstava mikroskopskog svijeta koje se dotiče klasičnih zamisli ali dodaje eksperimentima potvrđen kvantni pomak. Uzmimo za primjer sliku klizačice koja izvodi piruetu. Kad privuče ruke tijelu ruke, vrti se brže; kad raširi ruke, vrti se sporije. I, prije ili kasnije, ovisno o tome koliko silovito se bacila u vrtnju, usporit će

i zaustaviti se. To ne vrijedi za spin koji su otkrili Uhlenbeck i Goudsmit. Prema njihovom radu i kasnijim proučavanjima, svaki elektron u svemiru, uvijek i zauvijek, *vrti se stalnom i nepromjenjivom mjerom*. Spin elektrona nije prolazno stanje gibanja kao što jest za poznatije nam predmete koji se iz ovog ili onog razloga vrte. Umjesto toga, spin elektrona je *intrinzično* svojstvo, u velikoj mjeri nalik na njegovu masu ili električni naboj. Kad se elektron ne bi vrtio, ne bi bio elektron.

Premda su početne radove usmjerili na elektron, fizičari su potom dokazali da se te ideje o spinu primjenjuju jednako dobro na sve materijalne čestice koje popunjavaju sve tri porodice tablice 1.1. Vrijede sve do posljednje pojedinosti. *Sve* materijalne čestice (i njihovi antimaterijalni partneri) imaju spin jednak spinu elektrona. Jezikom struke, fizičari kažu da sve materijalne čestice imaju "spin-1/2", pri čemu je vrijednost 1/2, pojednostavljeno rečeno, kvantnomehanič-

ka mjera brzine kojom čestice rotiraju.[2] Štoviše, fizičari su dokazali da negravitacijske glasničke čestice – fotoni, slabi baždarni bozoni i gluoni – također posjeduju intrinzična obilježja spina, a pokazuje se da su dvostruka u odnosu na materijalne čestice. Sve one imaju "spin-1".

A što je s gravitacijom? Pa, još prije teorije struna fizičari su uspjeli odrediti kakav spin hipotetički graviton mora imati da bi bio prijenosnik gravitacijske sile. Odgovor: dvostruki u odnosu na spin fotona, slabih baždarnih bozona i gluona – to jest, "spin-2".

U kontekstu teorije struna – upravo poput mase i naboja sile – spin se povezuje s modelom titranja strune. Kao i kod točkastih čestica, donekle zavodi na krivi trag ako mislimo da spin koji nosi struna nastaje njezinom doslovnom vrtnjom u prostoru, ali ta usporedba daje sliku koju bismo mogli imati na umu. Usput rečeno, sada možemo pojasniti važno pitanje na koje smo prije naišli. Kada su Scherk i Schwarz 1974. objavili da se teoriju struna treba smatrati kvantnom

teorijom gravitacijske sile, to su učinili zato što su otkrili da strune u svom repertoaru nužno imaju titrajni model koji je nulte mase i ima spin-2 – ključna svojstva gravitona. Gdje je graviton, tu je i gravitacija.

S tim predznanjem o pojmu spina, razmotrimo sada ulogu koju je on igrao u otkrivaju rupe u rezultatu Colemana i Mandule u vezi s mogućim simetrijama prirode, koji smo spomenuli u prethodnom odjeljku.

Supersimetrija i superpartneri

Kao što smo istaknuli, pojam spina, premda je površno sličan slici vrtećeg zvrka, bitno se razlikuje od nje, na načine ukorijenjene u kvantnoj mehanici. Otkriće spina 1925.

---

[2] Preciznije rečeno, spin-1/2 znači da *kutni zamah* elektrona iz njegova spina iznosi $\hbar/2$.

značilo je da postoji još jedna vrsta rotacijskog gibanja koja jednostavno ne bi postojala u klasičnom univerzumu.

Tako se nameće sljedeće pitanje: kao što obično rotacijsko gibanje omogućuje načelo simetrije rotacijske invarijantnosti ("u fizici su sve prostorne orijentacije ravnopravne"), bi li moglo biti da istančanije rotacijsko gibanje povezano sa spinom vodi prema drugoj mogućoj simetriji zakona prirode? Oko 1971. fizičari su pokazali da je odgovor na to pitanje pozitivan. Iako je potpuna priča pomalo zapetljana, glavna ideja je da, kad je riječ o spinu, postoji upravo još jedna simetrija zakona prirode koja je matematički moguća. Poznata je kao supersimetrija.[3]

Supersimetriju se ne može povezati s jednostavnom i intuitivno razumljivom promjenom promatračkoga gledišta; promjene u vremenu, u prostoru, u kutnoj orijentaciji i u vektorskoj brzini gibanja jesu sve moguće promjene. No upravo kao što je spin "nalik rotacijskom gibanju s kvantnomehaničkim osobitostima", supersimetrija se može asocirati

s promjenom promatračkoga gledišta u "kvantnomehaničkom prostiranju prostora i vremena". Ti navodnici posebno su važni, jer bi prethodna rečenica trebala ponuditi samo grub dojam o tome gdje se supersimetrija uklapa u širi okvir načela supersimetrije.[4] No ipak, iako je razumijevanje pori-

---

3 Otkriće i razvoj supersimetrije ima zamršenu povijest. Osim onih koje smo naveli u tekstu, njoj su bitno pridonijeli R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Goljfand, E. P. Lichtman, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. Akulkov, D. V. Volkov i V. A. Soroka, među mnogima drugima. Dio njihova rada dokumentiran je u: Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersimetry*, Institute for Theoretical Physics, State University of New York at Stony Brook, ITP-SB-8878.

4 Matematički obrazovanom čitatelju napominjemo da ta ekstenzija uključuje dopunjavanje poznatih Kartezijevih koordinata, recimo u i v, koje su antikomutativne: $u \times v = -v \times u$. Supersimetriju se tada može shvatiti kao translacije u toj kvantnomehanički dopunjenoj formi prostorvremena.

jekla supersimetrije vrlo istančano, usredotočit ćemo se na jednu od njezinih glavnih implikacija – ako zakoni prirode sadrže njezina načela – koju je mnogo lakše shvatiti.

Početkom 1970-ih fizičari su shvatili da, ako je univerzum supersimetričan, prirodne čestice moraju postojati u *parovima* čiji se spinovi razlikuju za pola jedinice. Ti parovi čestica – bez obzira na to smatramo li ih točkastima (kao u standardnom modelu) ili sićušnim titrajućim petljama – zovu se *superpartneri*. Budući da materijalne čestice imaju spin-1/2 dok neke glasničke čestice imaju spin-1, čini se da supersimetrija rezultira sparivanjem – materijalnih i glasničkih čestica. Kao takva, ona se doima čudesnim konceptom ujedinjenja. Problem je u detaljima.

Sredinom 1970-ih, kada su fizičari pokušavali uključiti supersimetriju u standardni model, pronašli su da *nijedna* od poznatih čestica – onih iz tablice 1.1 i 1.2 – ne može biti superpartner nijednoj drugoj. Umjesto toga, detaljna teorijska analiza pokazala je da, ako univerzum uključuje

supersimetriju, onda svaka poznata čestica mora imati još neotkrivenu superpartnersku česticu čiji je spin za pola jedinice manji od svog poznatog partnera. Na primjer, trebala bi postojati partnerska čestica elektrona, sa spinom-0; ta hipotetička čestica nazvana je *selektron* (kratica od supersimetrični elektron). Isto bi trebalo vrijediti i za druge materijalne čestice: na primjer, hipotetički superpartneri neutrina i kvarkova sa spinom-0 zovu se *sneutrini* i *skvarkovi*. Slično tome, glasničke čestice trebaju imati superpartnere sa spinom-1/2: za foton trebao bi postojati *fotino*, za gluon *gluino*, a za bozone W i Z čestice *wino* i *zino*.

Dakle, kad se pobliže prouči, čini se da je supersimetrija vrlo rastrošna; zahtijeva cijeli roj dodatnih čestica koje na kraju udvostruče popis fundamentalnih sastojaka. Budući da nijedna od superpartnerskih čestica nije otkrivena, s pravom se možete prisjetiti Rabijeve primjedbe iz poglavlja 1 o otkriću miona, dodatno je razraditi i reći da "nitko nije zapo-

vjedio supersimetriju" te tako bez milosti odbaciti taj princip simetrije. No, mnogi fizičari vjeruju da bi tako prijek čin bio preuranjen. Za to imaju tri razloga. Razmotrimo ih.

Zalaganje za supersimetriju: prije teorije struna

Prvo, s estetskoga gledišta, fizičarima je teško vjerovati da bi priroda poštovala gotovo sve, ali ne baš sve matematički moguće simetrije. Naravno, moguće je da je nepotpuna primjena simetrije doista stvarnost, ali to bi bilo baš šteta. To bi bilo kao da Bach, nakon što je razvio mnogobrojne isprepletene glasove kako bi ispunio ingeniozan okvir muzičke simetrije, izostavi završni takt, kadencu.

Drugo, čak i unutar standardnog modela, teorije koja zanemaruje gravitaciju, trnovita tehnička pitanja povezana s kvantnim procesima začas se riješe ako je teorija supersimetrična. Osnovni problem u tome je što svaka vrsta če-

stica daje vlastiti prilog mikroskopskoj kvantnomehaničkoj groznici. Fizičari su otkrili da u toj uzavrelosti neki procesi koji uključuju čestične interakcije ostaju konzistentni *samo* ako se brojčani parametri u standardnom modelu vrlo fino podese – s preciznošću većom od jedan prema milijun milijardi – kako bi se poništili najzločestiji kvantni efekti. Takva preciznost može se usporediti s podešavanjem kuta ispaljivanja metka iz vrlo snažne puške tako da pogodi metu na Mjesecu s marginom pogreške manjom od debljine amebe. Iako se brojčana podešavanja slične preciznosti mogu izvoditi u standardnom modelu, mnogi fizičari prilično sumnjaju u teoriju koja je tako delikatno konstruirana da se raspada ako se broj o kojemu ovisi promijeni u petnaestoj decimali.[5]

---

[5] Za čitatelja zainteresiranog za potankosti o ovom stručnom pitanju napominjemo sljedeće. U bilješci 6 za poglavlje 6 spomenuli smo da standardni model priziva "masotvornu česticu" – Higgsov bozon – koji bi česticama iz tablica 1.1 i 1.2 dao opaženu masu. Da bi taj postupak uspio, Higgsova čestica ne smije biti preteška;

Supersimetrija to drastično mijenja jer *bozoni* – čestice čiji spin je cjelobrojan (nazvane po indijskom fizičaru imenom Satyendra Bose) – i *fermioni* – čestice čiji spin je polovica cijelog (neparnog) broja (nazvani po talijanskom fizičaru Enricu Fermiju) – teže poništavanju kvantnomehaničkih priloga. Poput suprotnih krajeva pile, kada su kvantni titraji bozona pozitivni, kvantni titraji fermiona teže tome da budu negativni, i obratno. Budući da supersimetrija osigurava da se bozoni i fermioni pojavljuju u parovima, od početka dolazi do značajnih poništavanja – poništavanja koja u znatnoj mjeri ublažavaju neke grozničave kvantne efekte. Pokazuje se da se dosljednost *supersimetričnog standardnog modela* – standardnog modela dopunjenog svim superpartnerskim česticama – više ne oslanja na neugodno delikatna brojčana podešavanja običnog standardnog modela. Premda je to vrlo stručno pitanje, mnogi fizičari čestica smatraju da je supersimetrija vrlo privlačna zbog tog postignuća.

Treći sklop nejasnih dokaza za supersimetriju izvire iz

pojma *velikog ujedinjenja*. Jedna od zagonetki četiriju prirodnih sila je golem raspon njima svojstvene jakosti. Elektromagnetska sila ima manje od 1% snage jake sile, slaba sila je oko tisuću puta slabija od elektromagnetske, a gravitacijska sila je još nekih stotinu milijuna milijardi milijardi milijardi (10–35) puta slabija. Slijedeći pionirski i na kraju Nobelovom nagradom ovjeren rad Glashowa, Salama i Weinberga, koji su uspostavili duboku povezanost elektromagnetske i slabe sile (što smo raspravili u poglavlju 5),

---

studije pokazuju da joj masa nikako ne bi smjela biti veća od oko 1000 masa protona. No pokazuje se da kvantne fluktuacije bitno pridonose masi Higgsove čestice i mogle bi joj povećati masu sve do Planckove skale. Teoretičari su ipak otkrili da se taj ishod, koji bi naznačio veliku manu standardnog modela, može izbjeći ako se neke parametre standardnog modela (prije svega takozvanu golu masu Higgsove čestice) fino podesi, s preciznošću od 1 prema 10^{15}, kako bi se poništilo učinke tih kvantnih fluktuacija na masu Higgsove čestice.

Glashow je 1974. zajedno s kolegom s Harvarda Howardom Georgijem sugerirao da bi se slična povezanost mogla uspostaviti i s jakom silom. Njihov rad, koji je predložio "veliko ujedinjenje" triju od četiriju sila, u bitnome se razlikovao od elektroslabe teorije: dok su elektromagnetska i slaba sila kristalizirale u većoj mjeri simetrično jedinstvo kad je temperatura univerzuma pala na oko milijun milijardi stupnjeva iznad apsolutne nule (1015 Kelvina), Georgi i Glashow pokazali su da bi unija s jakom silom bila očita samo na oko deset bilijuna puta višim temperaturama – oko deset milijardi milijardi milijardi stupnjeva iznad apsolutne nule (1028 Kelvina). Sa stajališta energije, to je oko milijun milijardi puta više od mase protona, ili oko četiri reda veličine manje od Planckove mase. Georgi i Glashow hrabro su prenijeli teorijsku fiziku u energijsko područje mnogo redova veličine iznad onoga koje se itko prije njih usudio istraživati.

Daljnji rad Georgija, Helen Quinn i Weinberga na Harvardu 1974. još je jače osvijetlio moguće jedinstvo negravi-

tacijskih sila unutar okvira velikog ujedinjenja. Budući da taj njihov doprinos i dalje igra važnu ulogu u ujedinjavanju sila i u procjeni koliko je supersimetrija važna u svijetu prirode, posvetimo mu nekoliko trenutaka.

Svi smo svjesni da električno privlačenje između dviju suprotno nabijenih čestica ili gravitacijsko privlačenje između dvaju masivnih tijela postaje jače kako se smanjuje udaljenost između tih objekata. To su jednostavna i dobro poznata svojstva klasične fizike. No kad istražujemo efekt kvantne fizike na jakost sila, nailazimo na iznenađenje. Zašto bi kvantna fizika uopće trebala imati ikakav učinak? Odgovor se opet krije u kvantnim fluktuacijama. Na primjer, kad istražujemo električno polje sile elektrona, zapravo ga sondiramo kroz "maglu" trenutnih erupcija i anihilacija čestica i antičestica, koje se pojavljuju u cjelokupnom prostoru oko njega. Fizičari su prije nekog vremena shvatili da ta prštava magla mikroskopskih fluktuacija prikriva punu

jakost polja sile elektrona, donekle kao što slaba magla djelomično prikriva svjetlo svjetionika. No, uočimo da kako se približavamo elektronu, prodirat ćemo kroz sve veći dio tog zamagljujućeg zastora od čestica i antičestica te stoga biti manje podložni njegovom utjecaju. To implicira da će jakost električnog polja elektrona *rasti* kako mu se budemo približavali.

Fizičari razlikuju taj kvantnomehanički porast jakosti kako se približavamo elektronu od onoga poznatog u klasičnoj fizici govoreći da se intrinzična snaga elektromagnetske sile pojačava na kraćim razdaljinama. To je odraz činjenice da se polje pojačava ne samo zato što smo bliže elektronu nego i zato što veći dio elektronovog električnog polja postaje vidljiv. Zapravo, iako smo se usredotočili na elektron, ta rasprava u jednakoj mjeri vrijedi za sve električno nabijene čestice i može se sažeti rečenicom koja glasi da kvantni efekti pojačavaju elektromagnetsku silu kad je se istražuje na manjim razdaljinama.

A što je s ostalim silama u standardnom modelu? Kako se njihova intrinzična sila mijenja s udaljenošću? Groos i Frank Wilczek na Princetonu i, neovisno o njima, David Politzer na Harvardu su 1973. proučavali to pitanje i našli neočekivan odgovor. Kvantni oblak erupcija i anihilacija čestica *povećava* snagu jake i slabe sile. To znači da pri ispitivanju na manjim udaljenostima prodiremo kroz veći dio tog kvantnog oblaka i stoga smo podložni njegovom manjem pojačavanju. I tako, jakost tih sila se *smanjuje* kad ih se sondira na manjim razdaljinama.

Georgi, Quinn i Weinberg pošli su od te spoznaje i doveli je do zanimljiva kraja. dokazali su da, kada se uračunaju efekti kvantne groznice, ukupan rezultat glasi da se snage svih triju negravitacijskih sila *izjednačuju*. Dok su snage tih sila vrlo različite na redovima veličina koji su dostupni današnjoj tehnologiji, Georgi, Quinn i Weinberg ustvrdili su da je ta razlika zapravo prouzročena različitim učinci-

ma koje izmaglica mikroskopske kvantne aktivnosti ima na različite sile. Njihovi izračuni pokazali su da, ako se u tu izmaglicu prodre istraživanjem sila ne u svakodnevnim razmjerima nego dok djeluju na razdaljinama od oko stotinke milijardinke milijardinke milijardinke (10–29) centimetra (što je samo deset tisuća puta više od Planckove duljine), čini se da tri negravitacijske sile postaju jednake.

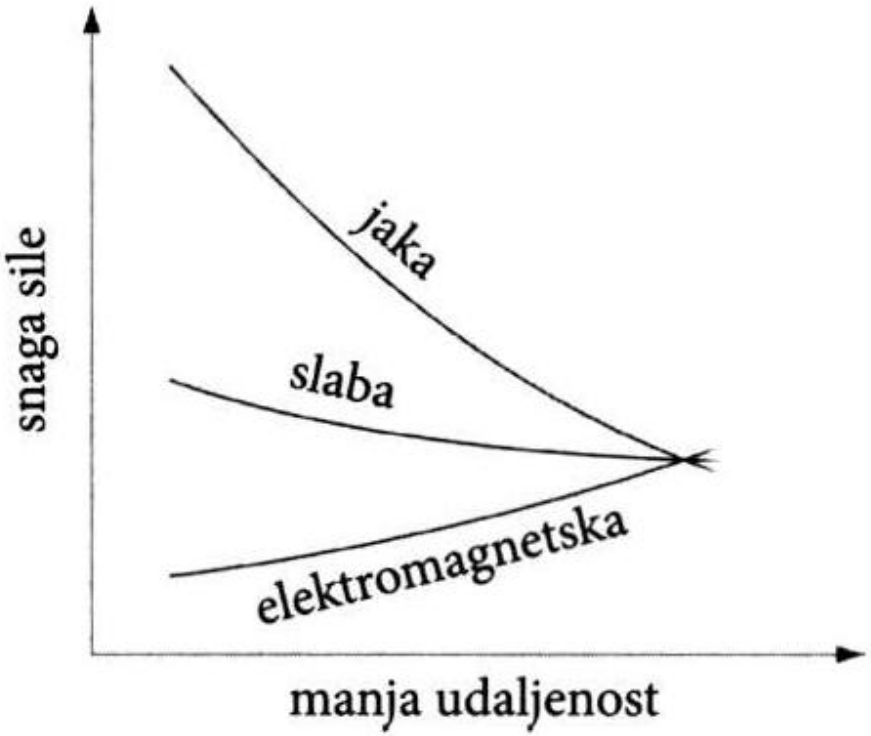
Iako je vrlo daleko od svakodnevnog iskustva, visoka energija nužna za sondiranje tako malenih udaljenosti bila je karakteristična za uzavreli, vreli rani univerzum kad je bio oko tisućinke bilijuntinke bilijuntinke bilijuntinke (10^{-39}) sekunde star – kad mu je temperatura bila reda veličine 10^{28} Kelvina, koju smo maloprije spomenuli. Donekle slično zbirci disparatnih predmeta – komadića metala, drva, kamenja, minerala itd. – koja se stapa i postaje jednolika, homogena plazma kad je zagrijemo na dovoljno visoku temperaturu, ti teorijski radovi sugerirali su da se jaka, slaba i elektromagnetska sila na tako visokim temperaturama stapaju u jednu

veliku silu. To je shematski prikazano na slici 7.1.[6]

Iako nemamo tehnologiju kojom bismo sondirali tako sićušne razdaljine ili proizveli tako visoke temperature, eksperimentatori su od 1974. znatno povećali preciznost mjerenja triju negravitacijskih sila u svakodnevnim uvjetima. Ti podaci – polazišta triju krivulja snage sila na slici 7.1 – jesu ulazni podaci za kvantnomehaničke ekstrapolacije Georgija, Quinn i Weinberga. Potom su Ugo Amaldi sa CERN-a,

---

[6] Jedna od neočekivanijih primjedbi o slici 7.1 glasi da se pokazuje kako je jakost slabe sile između jake i elektromagnetske sile, iako smo prethodno rekli da je slabija od obiju. Razlog tome krije se u tablici 1.2, u kojoj vidimo da su glasničke čestice slabe sile prilično masivne, dok su one koje pripadaju jakoj i elektromagnetskoj sili bez ikakve mase. Sama po sebi, jakost slabe sile (mjerena svojom konstantom vezivanje – o tome ćemo u poglavlju 12) jest kakva je prikazana na slici 7.1, ali njezine masivne glasničke čestice sporo prenose njen utjecaj i umanjuju joj učinak. U poglavlju 14 vidjet ćemo kako se u sliku 7.1 uklapa gravitacijska sila.



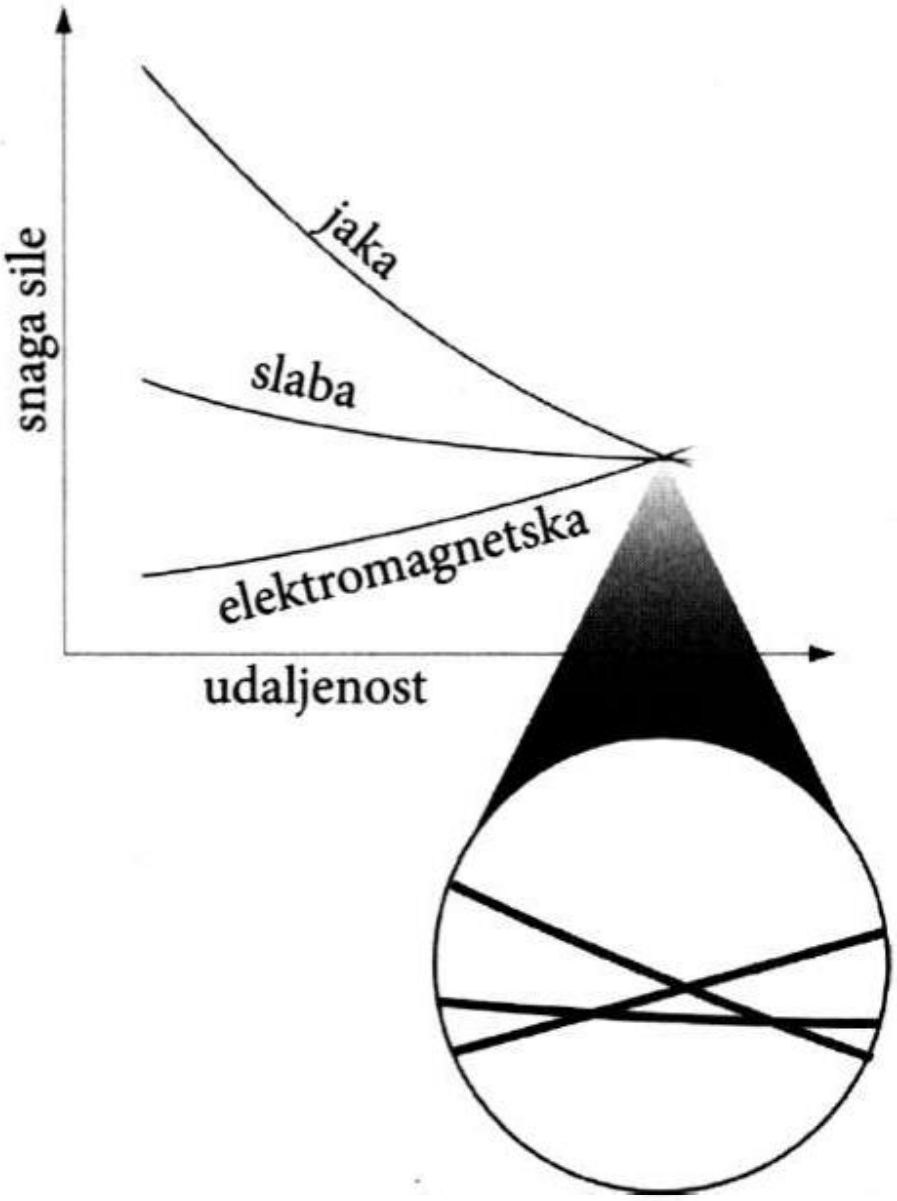
Slika 7.1 Jakosti triju negravitacijskih sila dok djeluju na sve manjim razdaljinama – ili, ekvivalentno, dok djeluju u procesima sve veće energije.

Wim de Boer i Hermann Fürstenau sa sveučilišta u Karlsruheu 1991. ponovno izračunali ekstrapolacije Georgija, Quinn i Weinberga poslužívši se tim poboljšanim eksperimentima i dokazali dvije važne tvrdnje. Prvo, snage triju

negravitacijskih sila na malim razdaljinama (ekvivalentno, na visokoj energiji/temperaturi) *gotovo da se poklapaju , ali ne u potpunosti,* kao što je prikazano na slici 7.2. Drugo, ta sićušna ali neporeciva diskrepancija u njihovim snagama *nestaje* ako se uključi supersimetrija. Razlog tome je to što nove superpartnerske čestice koje zahtijeva supersimetrija pridonose novim kvantnim fluktuacijama, a te fluktuacije su upravo dovoljne da "pogurnu" jakosti triju sila da se izjednače.

Mnogim fizičarima krajnje je teško povjerovati da je svijet prirode odabrao sile tako da *gotovo*, ali ne i potpuno, imaju jakosti koje se mikroskopski ujedinjuju – mikroskopski se izjednačuju. To je kao da složite slagalicu u kojoj je posljednji komadić izobličen pa se za malo ne uklapa u svoje mjesto. Supersimetrija vješto brusi njegov oblik kako bi svi komadići glatko legli na svoje mjesto.

Drugi aspekt te potonje spoznaje u tome je što ona nudi mogući odgovor na pitanje zašto nismo otkrili nijednu su-



Slika 7.2 Doradivanje izračuna snaga sila otkriva da se bez supersi-
metrije one zamalo susretnu, ali ne i doista

metrije one zaista susretnu, ali ne i doista.

perpartnersku česticu? Izračuni koji vode prema konvergenciji snaga sila, kao ostala pitanja koja su proučavali mnogi fizičari, naznačuju da superpartnerske čestice moraju biti znatno teže od poznatih čestica. Iako ne možemo donositi nikakva definitivna predviđanja, studije pokazuju da bi superpartnerske čestice mogle biti tisuću puta masivnije od protona, ako ne i još teže. Budući da naši najmoderniji akceleratori ne mogu doseći takve energije, to je objašnjenje zašto te čestice još nisu otkrivene. U poglavlju 9 vratit ćemo se raspravi o mogućnostima da se u eksperimentima u bliskoj budućnosti odredi je li supersimetrija uistinu svojstvo našega svijeta.

Naravno, razlozi koje smo dali za vjerovanje u supersimetriju – ili barem neodbacivanje – daleko su od toga da budu neoborivi. Opisali smo kako supersimetrija uzdiže naše teorije u njihov najsimetričniji oblik – ali mogli bi-

ste sugerirati da se univerzum ne brine je li ostvario najsimetričniji oblik koji je matematički moguć. Istaknuli smo važan tehnički razlog, da nas supersimetrija oslobađa od osjetljivog zadatka da usklađujemo brojčane parametre u standardnom modelu kako bismo izbjegli istančane kvantne probleme – ali biste mogli ustvrditi da istinska teorija koja opisuje prirodu mora hodati tankom linijom između dosljednosti sebi i samouništenja. Raspravili smo kako supersimetrija modificira karakterističnu jakost triju negravitacijskih sila na sićušnim udaljenostima upravo tako da se one stope u veliku ujedinjenu silu – ali ponovno biste mogli ustvrditi da ništa u planu prirode ne određuje da se jakosti tih triju sila baš moraju poklapati na mikroskopskoj razini. I na kraju, mogli biste sugerirati da jednostavnije objašnjenje zašto superpartnerske čestice nisu pronađene glasi da je to zato što naš univerzum nije supersimetričan i da stoga superpartneri ne postoje.

Nitko ne može pobiti nijedan od tih odgovora. No, izgle-

di supersimetrije znatno rastu ako razmotrimo njezinu ulogu u teoriji struna.

Supersimetrija u teoriji struna

Prvotna teorija struna koja je izrasla iz Venezianova rada krajem 1960-ih uključivala je sve simetrije razmotrene na početku ovog poglavlja, ali nije uključivala supersimetriju (koja još nije bila otkrivena). Ta prva teorija zasnovana na pojmu strune preciznije se nazivala *bozonskom teorijom struna*. Naziv *bozonska* naznačuje da svi titrajni modeli bozonske strune imaju cjelobrojni spin – naime, ne postoje fermionski modeli, tj. modeli čiji se spin za pola broja razlikuje od cijelog broja. To je stvorilo dva problema.

Prvo, ako je teorija struna trebala opisati sve sile i svu materiju, morala je nekako uključiti fermionske titrajne modele, jer sve poznate materijalne čestice imaju spin-1/2. Drugo, i

mnogo problematičnije, bila je spoznaja da u bozonskoj teoriji struna postoji jedan model titranja čija je masa (preciznije, kvadrirana masa) *negativna* – takozvani tahion. Fizičari su i prije teorije struna proučavali mogućnost da bi u našem svijetu moglo biti tahionskih čestica, uz poznate čestice koje sve imaju pozitivnu masu, ali njihov trud pokazao je da je teško, ako ne i nemoguće da takva teorija bude logički održiva. Slično tome, fizičari su u kontekstu bozonske teorije iskušali svakojake domišljate trikove ne bi li osmislili bizarna predviđanja tahionskog titrajnog modela, ali uzalud. Zbog toga je postajalo sve jasnije da bozonskoj teoriji struna nedostaje nešto bitno, iako je to bila zanimljiva teorija.

Pierre Ramond sa sveučilišta Florida 1971. godine prihvatio je izazov modificiranja bozonske teorije struna kako bi ona uključila fermionske titrajne modele. Iz njegovih radova i iz kasnijih rezultata do kojih su došli Schwarz i André Neveu počela se pomaljati nova verzija teorije struna. Na opće iznenađenje, pokazalo se da su bozonski titrajni mo-

deli te nove teorije spareni s fermionskima. Svaki bozonski model imao je svoj fermionski i obratno. Do 1977. su Ferdinando Gliozzi s Torinskog sveučilišta, Scherk i David Olive s Imperijalnoga koledža uspjeli sagledati ta sparivanja u pravom svjetlu. Nova teorija struna sadržavala je supersimetriju, a uočeno sparivanje bozonskih i fermionskih titrajnih modela odražavalo je visoku razinu simetričnosti. Rođena je supersimetrična teorija struna – to jest, teorija superstruna. Štoviše, Gliozzi, Scherk i Olive došli su do još jednog presudnog rezultata. Dokazali su da problematična tahionska vibracija bozonske strune ne utječe negativno na superstrunu. Komadići slagalice struna polako su počeli pronalaziti svoja mjesta.

No ipak, glavni utjecaj Ramondova rada, a i Neveua i Schwarza, na početku zapravo nije bio na teoriju struna. Fizičari Julius Wess i Bruno Zumino su 1973. otkrili da je supersimetrija – nova simetrija koja nastaje preformulacijom

teorije struna – primjenjiva čak i na teorije zasnovane na točkastim česticama. Brzo su načinili važan napredak prema uključivanju supersimetrije u okvir kvantne teorije polja točkastih čestica. A budući da je u to vrijeme kvantna teorija polja bila vrlo popularna u glavnoj struji zajednice fizičara čestica – dok se teorija struna sve više potiskivala na marginu – spoznaje Wessa i Zumina pokrenule su golemu količinu daljnjih istraživanja o onome što je postalo poznato kao *supersimetrična kvantna teorija polja*. Supersimetrični standardni model, koji smo raspravili u prethodnom odjeljku, jedno je od krunskih postignuća tih radova; sada vidimo da čak i ta teorija točkastih čestica iz povijesne perspektive duguje mnogo teoriji struna.

S obnovom teorije struna sredinom 1980-ih supersimetrija se ponovno pojavila u kontekstu svog prvotnog otkrića. U tom okviru, pitanje supersimetrije nadilazi ono što smo izložili u prethodnom odjeljku. Teorija struna jedini je poznat način na koji možemo spojiti opću teoriju relativnosti

i kvantnu mehaniku. Ali, samo supersimetrična verzija teorije struna izbjegava opasni problem tahiona i ima fermionske titrajne modele koji mogu objasniti materijalne čestice što tvore svijet oko nas. Supersimetrija stoga ide ruku pod ruku s kvantnom teorijom gravitacije koju predlaže teorija struna, a i sa svojim obećanjem o ujedinjenju svih sila i sve materije. Ako je teorija struna istinita, fizičari očekuju da je takva i supersimetrija.

No, jedan posebno problematičan aspekt mučio je teoriju struna sve do sredine 1990-ih.

Superneugodno bogatstvo

Ako vam netko kaže da je riješio misterij sudbine Amelije Earhart, možda ćete na početku biti skeptični, ali ako ta osoba ima bogato dokumentirano i promišljeno objašnjenje,

vjerojatno ćete ju saslušati i, tko zna, možda će vas i uvjeriti. Ali što ako vam već u sljedećoj rečenici kaže da zapravo ima i drugo objašnjenje. Strpljivo slušate i s iznenađenjem shvaćate da je alternativno objašnjenje jednako bogato dokumentirano i promišljeno kao i prvo. A nakon što ste proučili drugo objašnjenje, dobijete i treće, pa četvrto, pa čak i peto objašnjenje – a sva se međusobno razlikuju i sva su jednako uvjerljiva. Na kraju zasigurno nećete misliti da ste bliže istini o sudbini Amelije Earhart nego što ste bili na početku. Kad je riječ o fundamentalnim objašnjenjima, nedvojbeno vrijedi izreka "više je manje".

Teorija struna – bez obzira na opravdano uzbuđenje koje je izazivala – 1985. godine počinjala je zvučati poput našeg odviše revnog stručnjaka za Ameliju Earhart. Razlog tome je to što su 1985. fizičari shvatili da bi se supersimetrija, tada već glavni element strukture teorije struna, zapravo mogla uključiti u teoriju struna ne na jedan, nego na *pet* različitih načina. Svaka metoda rezultira sparivanjem bozonskih i

fermionskih titrajnih modela, ali pojedinosti tog sparivanja, kao i brojna druga svojstva nastalih teorija znatno se razlikuju. Iako im imena nisu tako važna, vrijedi zabilježiti da se tih pet supersimetričnih teorija struna zovu *teorija tipa I, teorija tipa IIA, teorija tipa IIB, heterotička teorija tipa O(32)* (izgovara se "o-trideset dva") i *heterotička teorija tipa* $E_8 \times E_8$ (izgovara se "e-osam puta e-osam"). Sva svojstva teorije struna koja smo dosad razmatrali vrijede za sve te teorije – one se razlikuju samo u istančanim pojedinostima.

Teoretičarima struna bilo je prilično neugodno imati pet verzija onoga što bi trebalo biti T.O.E. – možda konačna ujedinjena teorija. Kao što postoji jedno istinito objašnjenje onoga što se dogodilo Ameliji Earhart (bez obzira na to hoćemo li ga ikada doznati), očekujemo da isto vrijedi i za najdublje, fundamentalno razumijevanje kako svijet funkcionira. Živimo u jednom univerzumu; očekujemo jedno objašnjenje.

Jedan prijedlog za rješenje tog problema mogao bi biti da se četiri od pet različitih teorija superstruna jednostavno može isključiti eksperimentima, pa će ostati jedan, istinit i relevantan okvir za objašnjavanje. No čak i kad bi to bio slučaj, kopkalo bi nas pitanje zašto uopće postoje ostale teorije. Kako je to duhovito rekao Witten: "Ako naš univerzum opisuje jedna od tih pet teorija, tko onda živi u ostala četiri svijeta? "[7] Fizičarev san je da potraga za konačnim odgovorima dovede do jednog, jedinstvenog, apsolutno neizbježnog zaključka. U idealnom slučaju, konačna teorija – teorija struna ili neka druga – bila bi to što jest zato što jednostavno ne bi bilo druge mogućnosti. Kad bismo otkrili da postoji samo jedna logički održiva teorija koja sadrži osnovne elemente relativnosti i kvantne mehanike, mnogi misle da bismo došli do najdubljeg razumijevanja zašto univerzum ima ona svojstva koja ima. Ukratko, bio bi to raj za ujedinjenu teoriju.[8]

Kao što ćemo vidjeti u poglavlju 12, novija istraživanja

odvela su teoriju struna velik korak bliže toj utopiji ujedinjenosti tako što su pokazala da su tih pet teorija zapravo pet različitih načina da se opiše *jedna te ista sveobuhvatna teorija.* Teorija superstruna *doista* ima pedigre jedinstvenosti.

Čini se da stvari dolaze na svoje mjesto, ali, o čemu ćemo raspraviti u sljedećem poglavlju, ujedinjenje putem teorije struna zahtijeva još jedno važno odstupanje od uobičajene mudrosti.

---

7 Edward Witten, predavanje u okviru Heinz Pagels Memorial Lecture Series, Aspen, Colorado, 1997.

8 Detaljnu raspravu o tim i srodnim idejama vidi u: Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory.* Usp. *U potrazi za konačnom teorijom* (Izvori, Zagreb 1997).

OSMO POGLAVLJE

Više dimenzija nego što ih oko vidi

Einstein je specijalnom i općom teorijom relativnosti razriješio dva glavna znanstvena sukoba proteklih stotinu godina. Iako početni problemi koji su motivirali njegov rad nisu pretkazivali ishod, oba razrješenja u potpunosti su promijenila naše razumijevanje prostora i vremena. Teorija struna tako temeljito trese zgradu moderne fizike da se čak i op-

čeprihvaćen broj dimenzija u našem svemiru – nešto tako osnovno da vjerojatno mislite da se ne može dovesti u pitanje – dramatično i uvjerljivo ruši.

Iluzija poznatoga

Iskustvo oblikuje intuiciju. No, čini i više od toga: iskustvo postavlja okvir unutar kojega analiziramo i interpretiramo ono što percipiramo. Na primjer, nedvojbeno biste očekivali da bi "divlje dijete" koje je odgojio čopor vukova tumačilo svijet iz perspektive koja se znatno razlikuje od naše. Čak i manje ekstremne usporedbe, poput onih između ljudi odgojenih u vrlo različitim kulturalnim tradicijama, ističu u kojem stupnju naša iskustva određuju naš interpretativni mentalitet.

No, postoje određene stvari koje *svi* doživljavamo. Vjerovanja i očekivanja koja slijede iz tih općih iskustava možda

je najteže identificirati i dovesti u pitanje. Evo jednostavnog, ali dubokog primjera. Ako prestanete čitati ovu knjigu, možete krenuti u tri neovisna smjera – naime, kroz tri nezavisne prostorne dimenzije. Apsolutno svaki put kojim krenete – koliko god bio kompliciran – neka je kombinacija gibanja kroz ono što bismo mogli nazvati "dimenzijom lijevo-desno", "dimenzijom naprijed-natrag" i "dimenzijom gore-dolje". Kad god koraknete, implicitno donosite tri zasebne odluke koje određuju kako se gibate kroz te tri dimenzije.

Ekvivalentna tvrdnja, na koju smo naišli u svojoj raspravi o specijalnoj teoriji relativnosti, glasi da se svaku lokaciju u svemiru može u potpunosti odrediti dajući tri podatka: gdje se nalazi u odnosu na te tri prostorne dimenzije. Govoreći kolokvijalnim jezikom, adresu u gradu možete specificirati tako da navedete ulicu (lokacija u "dimenziji lijevo-desno"), ulicu ili aveniju koja se križa s njom (lokacija u "dimenziji naprijed-natrag") i broj kata (lokacija u "dimenziji gore-dolje"). Iz modernije perspektive, vidjeli smo da nas Einstei-

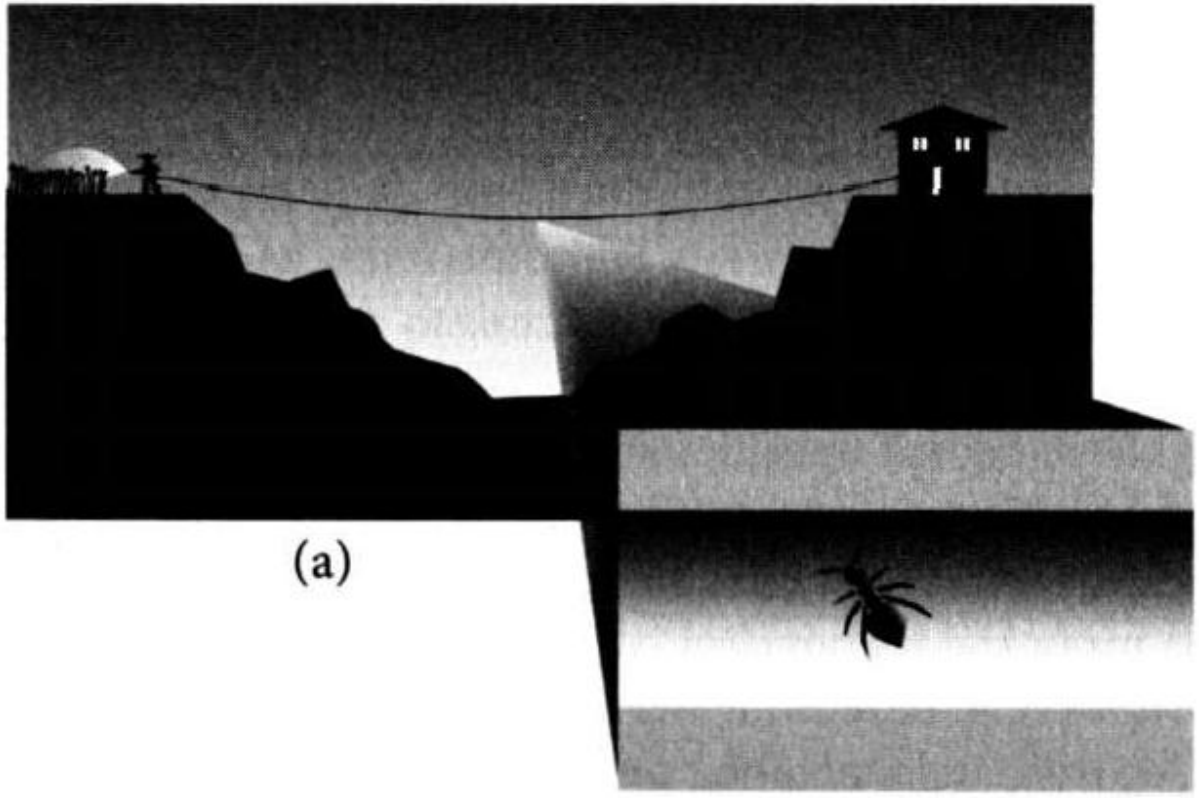
nov rad potiče da vrijeme shvatimo kao još jednu dimenziju ("dimenziju prošlost-budućnost"), što nam daje zbroj od četiri dimenzije (tri prostorne dimenzije i jedna vremenska). Događaje u univerzumu određujemo tako što kažemo gdje i kada su se dogodili.

To svojstvo univerzuma je tako osnovno, tako dosljedno i tako sveprisutno da se čini kako ga se uistinu ne može dovesti u pitanje. No, 1919. godine je malo poznati njemački matematičar Theodor Kaluza sa sveučilišta u Königsbergu imao hrabrosti da dovede u pitanje ono što je očito – sugerirao je da univerzum možda nema tri prostorne dimenzije; možda ih ima *više*. Prijedlozi koji zvuče smiješno katkad i jesu smiješni. Katkad pak potresu temelje fizike. Premda je bilo potrebno da neko vrijeme odstoji, Kaluzin prijedlog pokrenuo je revoluciju u našim formulacijama fizikalnih zakona. Još osjećamo odjeke te spoznaje koja je mnogo toga pretkazala.

Prijedlog da bi naš univerzum mogao imati više od tri prostorne dimenzije možda se doima šarlatanskim, bizarnim ili mističnim. No, on je zapravo konkretan i posve moguć. Da bismo to vidjeli, najlakše je privremeno skrenuti pogled s cijelog univerzuma i razmisliti o kakvu poznatijem predmetu, kao što je dugačko, tanko vrtno crijevo.

Zamislimo da je stotinjak metara vrtnog crijeva rastegnuto preko kanjona, a mi ga promatramo s udaljenosti od, recimo, 400 metara, kao na slici 8.1(a). S te udaljenosti lako ćete vidjeti dugačko, odvijeno, horizontalno prostiranje crijeva, ali ako nemate neprirodno oštar vid, *debljinu* crijeva teško ćete razaznati. Sa svoga udaljenog gledišta pomislili biste da, ako na crijevu živi mrav, može hodati samo u jednoj dimenziji: u dimenziji lijevo-desno uzduž crijeva. Kad bi vas netko zamolio da odredite gdje je mrav bio u danom trenutku, morali biste dati samo jedan podatak: udaljenost

mrava od lijevog (ili desnog) kraja crijeva. Rezultat toga je da se s udaljenosti od 400 metara dugačak komad crijeva doima poput jednodimenzionalnog predmeta.



(a)

(b)

Slika 8.1 (a) Vrtno crijevo viđeno sa znatne udaljenosti izgleda kao jednodimenzionalni objekt. (b) Kad ga se poveća, postaje vidljiva i druga dimenzija – ona koja je u obliku kruga i omotana je oko crijeva.

Znamo da u stvarnosti crijevo ima debljinu. Možda vam je teško razlučiti je s 400 metara, ali ako se poslužite dalekozorom moći ćete zumirati na crijevo i izravno promatrati njegovu debljinu, kao što je prikazano na slici 8.1(b). Promatrajući s takvim povećanjem, vidimo da mali mrav koji živi na crijevu zapravo ima *dva* neovisna smjera u kojima može krenuti: uzduž dimenzije lijevo-desno koja se proteže duljinom crijeva kao što smo već objasnili, i uzduž "dimenzije u smjeru kazaljke i obratno". Sada shvaćamo da nam za određivanje gdje je mravić u svakom danom trenutku zapravo trebaju *dva* podatka: gdje je mrav uzduž crijeva i gdje je mrav uzduž njegova kružnog opsega. To je odraz činjenice da je površina vrtnog crijeva dvodimenzionalna.[1]

No ipak postoji jasna razlika između tih dviju dimenzija. Smjer uzduž crijeva je dugačak, protežan i lako vidljiv. Smjer koji kruži opsegom crijeva je kratak, "uvijen" i teže vidljiv. Da bismo postali svjesni kružne dimenzije, moramo istražiti crijevo znatno preciznije.

Ovaj primjer ističe istančano i važno svojstvo prostornih dimenzija: postoje dvije vrste njih. Mogu biti velike, protežne i stoga izravno manifestirane, a mogu biti i male-

---

[1] To je jednostavna misao, ali budući da nepreciznost svakodnevnog jezika katkad stvara zabunu, potrebno ju je pojasniti dvjema napomenama. Prvo, pretpostavljamo da je mrav osuđen na život na *površini* vrtnoga crijeva. Suprotno tome, kad bi mrav mogao ući u unutrašnjost crijeva – kad bi mogao prodrijeti u gumeni materijal crijeva – trebali bismo tri broja da bismo mu odredili položaj, jer bismo morali specificirati i koliko duboko se ukopao. No ako mrav živi samo na površini crijeva, lokaciju mu možemo odrediti samo dvama brojevima. To nas vodi do druge napomene. Čak i ako mrav živi na površini crijeva, mogli bismo, ako hoćemo, njegovu lokaciju odrediti trima brojevima: uobičajenim dimenzijama našeg trodimenzionalnog prostora – lijevo-desno, naprijed-natrag i gore-dolje. No ako znamo da mrav živi na površini crijeva, dva broja na koje se pozivamo u tekstu daju *minimalne* podatke koji jedinstveno određuju položaj mrava. To želimo reći kad kažemo da je površina crijeva dvodimenzionalna.

ne, uvijene i prikrivene. Naravno, u ovom primjeru niste se morali baš jako potruditi da otkrijete "uvijenu" dimenziju koja okružuje opseg crijeva. Morali ste se samo poslužiti dalekozorom. Međutim, da ste imali vrlo tanko vrtno crijevo – tanko poput vlasi ili kapilare – bilo bi teže otkriti njegovu uvijenu dimenziju.

U članku koji je poslao Einsteinu 1919, Kaluza je dao neobičan prijedlog. Sugerirao je da prostorno tkivo univerzuma posjeduje više od tri dimenzije iz uobičajenog iskustva. Motivacija za tu radikalnu tezu, o čemu ćemo uskoro raspravljati, bila je Kaluzina spoznaja da ona pruža elegantan i uvjerljiv okvir za povezivanje Einsteinove opće teorije relativnosti i Maxwellove elektromagnetske teorije u jednu, ujedinjenu pojmovnu mrežu. No, što je neposrednije pitanje, kako se taj prijedlog može uskladiti s očitom činjenicom da *vidimo* upravo tri prostorne dimenzije?

Odgovor, implicitan u Kaluzinom radu, a potom ga je 1926. razradio švedski matematičar Oskar Klein, glasi da

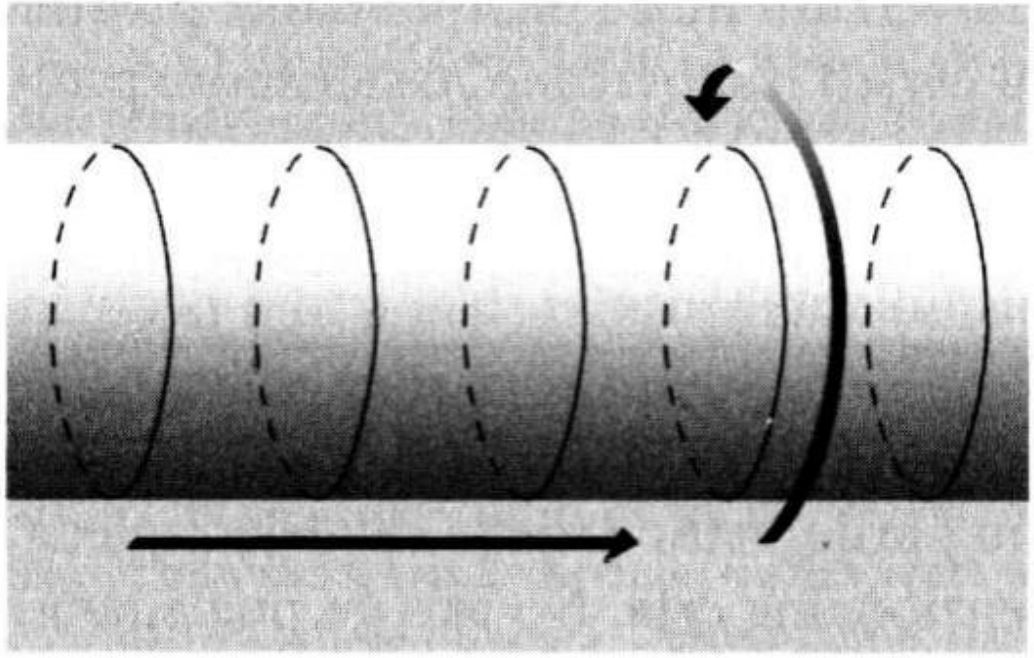
prostorno tkivo našega univerzuma može imati i protežne i uvijene dimenzije. Naime, upravo poput horizontalne protežnosti vrtnoga crijeva, i naš univerzum ima dimenzije koje su velike, protežne i lako vidljive – tri prostorne dimenzije iz svakodnevnog iskustva. No poput kružnog opsega vrtnog crijeva, i univerzum može imati dodatne prostorne dimenzije koje su čvrsto "zakovrčane" u sićušnom prostoru – tako sićušnom da se zasad odupire detekciji našom najnaprednijom eksperimentalnom opremom.

Kako bismo dobili jasniju sliku o tom neobičnom prijedlogu, vratimo se na trenutak vrtnom crijevu. Zamislimo da je ono obojeno crnim krugovima, gusto raspoređenim po duljini. Kao i prije, vrtno crijevo izdaleka izgleda kao tanka, jednodimenzionalna crta. No ako ga pogledamo dalekozorom, otkrit ćete uvijenu dimenziju, i to još lakše nakon što smo obojili crijevo, i vidjet ćete ono što smo ilustrirali na slici 8.2. Taj crtež ističe da je površina vrtnog crijeva dvodimenzi-

onalna, s jednom velikom, protežnom dimenzijom i jednom malenom, kružnom dimenzijom. Kaluza i Klein predložili su da je naš prostorni univerzum sličan, ali da ima tri velike, protežne prostorne dimenzije i jednu malenu kružnu dimenziju – ukupno četiri prostorne dimenzije. Teško je nacrtati nešto s toliko mnogo dimenzija, pa se u svrhu vizualizacije moramo zadovoljiti ilustracijom koja sadrži dvije velike dimenzije i jednu malenu kružnu dimenziju. To ilustriramo na slici 8.3, na kojoj smo povećali tkivo prostora na uglavnom isti način kao što smo zumirali na površinu vrtnog crijeva.

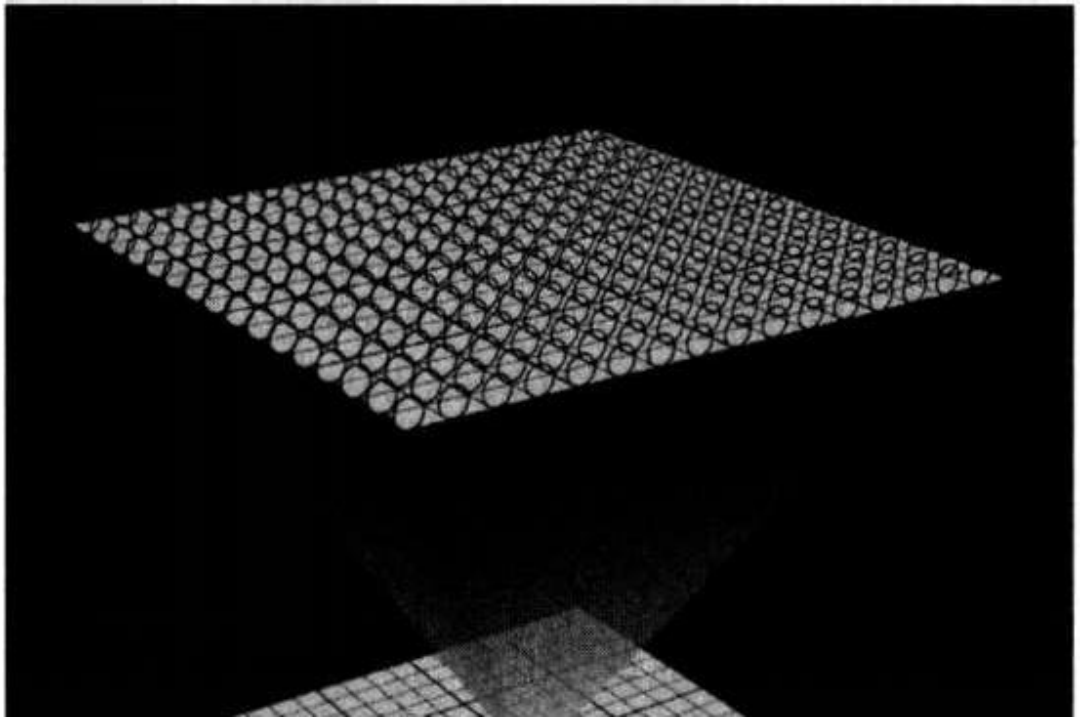
Najniža razina na ilustraciji prikazuje očitu strukturu prostora – običan svijet oko nas – na poznatim nam razdaljinama koje se mjere metrima. Te udaljenosti predstavljene su najvećom mrežom linija. Na sljedećim razinama zumiramo na tkivo prostora usredotočujući se na sve manja područja, koja redom povećavamo kako bi postala lako vidljiva. Na početku, dok istražujemo tkivo prostora na kraćim razdaljinama, ništa se ne mijenja, kao što vidimo na prve tri razine

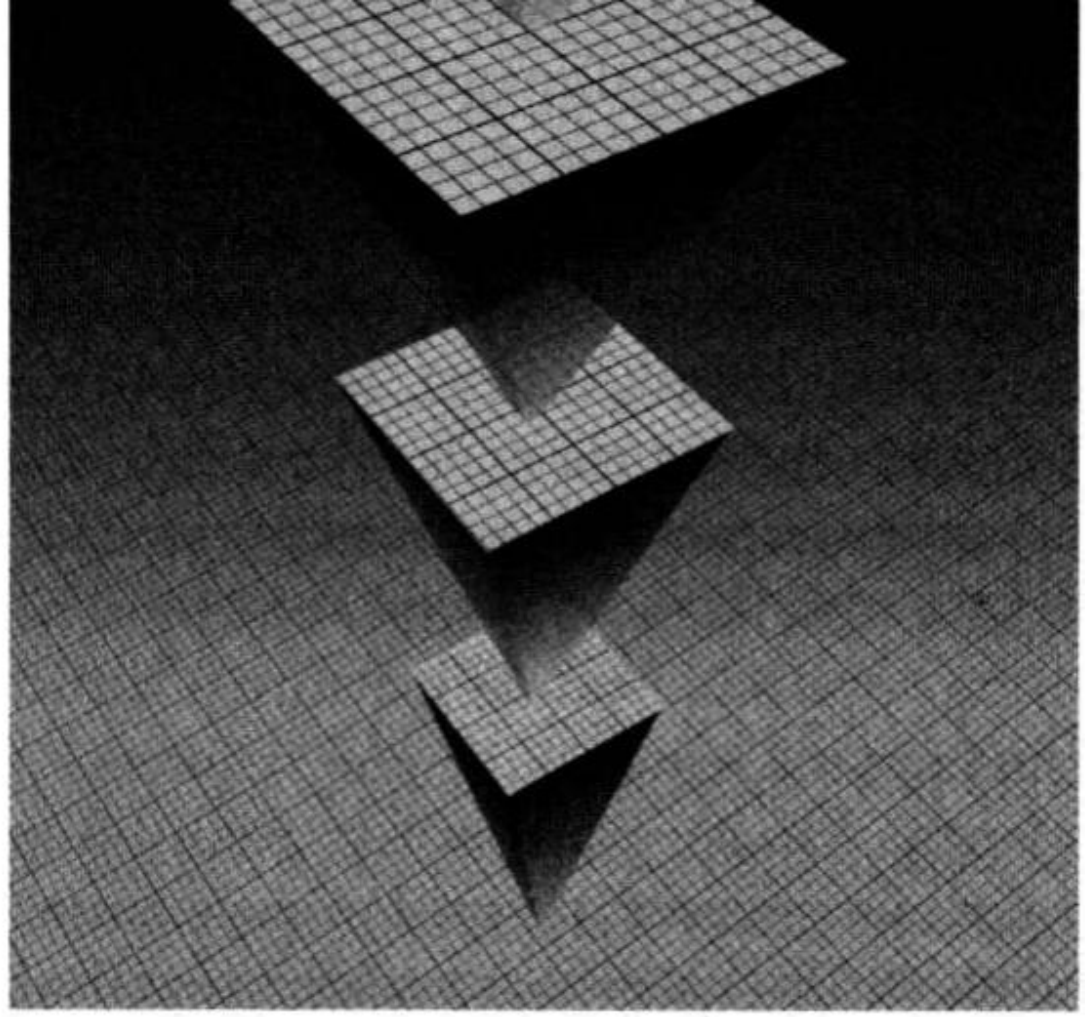
povećanja. No, kako nastavljamo putovanje prema istraživanju prostora na mikroskopskoj razini u najvećoj mjeri – četvrta razina povećanja na slici 8.3 – pojavljuje se nova, uvijena, kružna dimenzija, u dobroj mjeri nalik na kružne petlje niti koje tvore potku gusto istkana saga. Kaluza i Klein



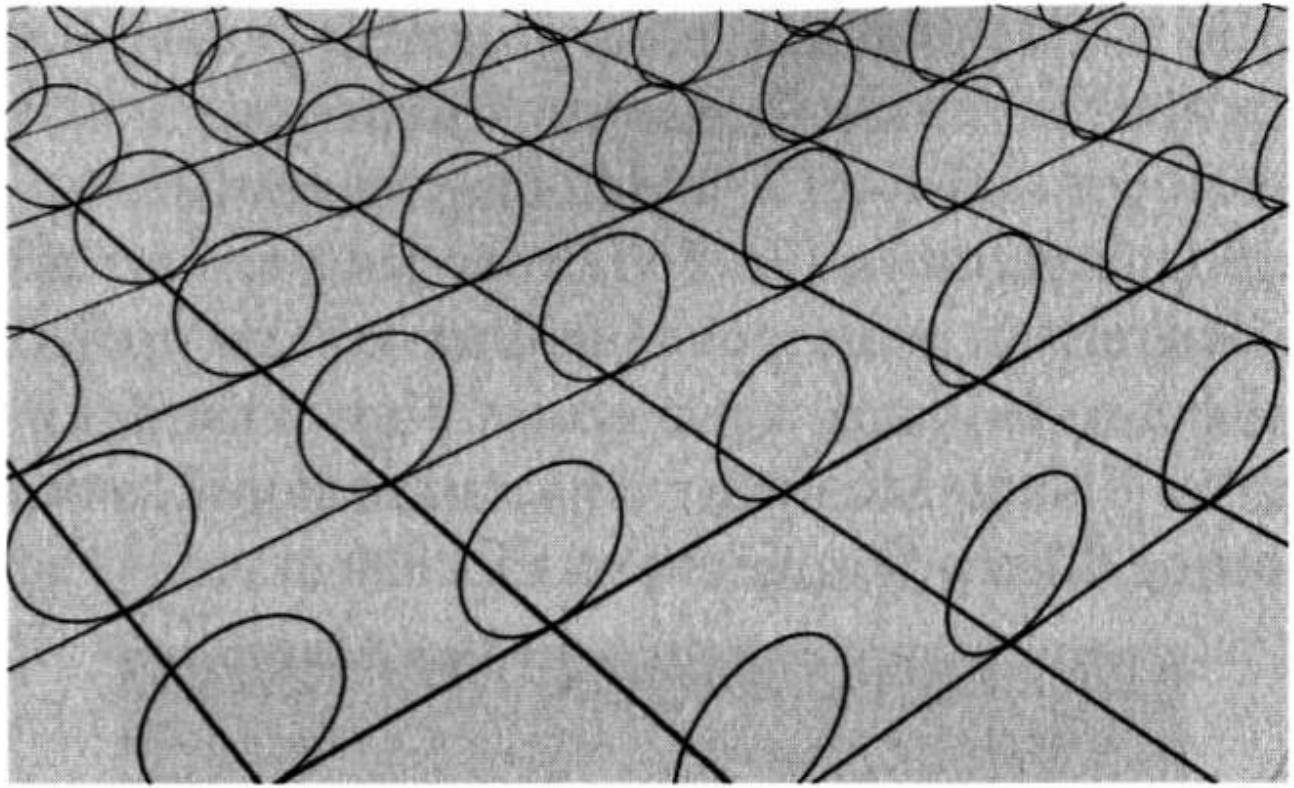
Slika 8.2 Površina vrtnog crijeva je dvodimenzionalna: jedna dimenzija (horizontalno prostiranje), označena ravnom strelicom, dugačka je i protežna; druga dimenzija (kružni opseg crijeva) kratka je i uvijena.

naznačili su da dodatna kružna dimenzija postoji u *svakoj* točki protežnih dimenzija, kao što kružni opseg vrtnog crijeva postoji u svakoj točki uzduž njegova neuvijenog, horizontalnog prostiranja. (Radi vizualne jasnoće nacrtali smo samo ilustrativan primjer kružne dimenzije na podjednako razmaknutim točkama u protežnim dimenzijama.) Pogled izbliza na Kaluza-Kleinovu viziju mikroskopske strukture prostornog tkiva prikazujemo na slici 8.4





Slika 8.3 Kao na slici 5.1, svaka sljedeća razina prikazuje veliko povećanje prostornoga tkiva prikazanog na prethodnoj razini. Naš univerzum može imati dodatne dimenzije – što vidimo na četvrtoj razini povećanja – ako su uvijene u dovoljno malen prostor da ih dosad nismo uspjeli detektirati.



Slika 8.4 Linije mreže predstavljaju protežne dimenzije iz uobičajenog iskustva, dok su krugovi nova, sićušna, uvijena dimenzija. Poput kružnih petlji niti koje čine sag, krugovi postoje u svakoj točki u poznatim nam protežnim dimenzijama – ali radi vizualne jasnoće crtamo ih kao da se šire na presjecištima linija.

Sličnost s vrtnim crijevom očita je, iako postoje neke važne razlike. Univerzum ima tri velike, protežne prostorne

dimenzije (od kojih smo zapravo nacrtali samo dvije), u usporedbi s jednom takvom dimenzijom vrtnog crijeva, a što je još važnije, sada opisujemo prostorno tkivo *samoga univerzuma*, a ne nekog predmeta kao što je vrtno crijevo, koje postoji unutar univerzuma. No, osnovna zamisao je ista: poput kružnog opsega vrtnog crijeva, ako je dodatna uvijena, kružna dimenzija ekstremno malena, mnogo ju je teže otkriti nego manifestnu, veliku, protežnu dimenziju. Zapravo, ako je dovoljno malena, neće je moći otkriti ni naši najjači instrumenti za povećanje. A što je najvažnije, kružna dimenzija *nije* samo kružna nateklina unutar nama poznatih protežnih dimenzija kao što biste možda pomislili na temelju ilustracije. Kružna dimenzija je uistinu nova dimenzija, koja postoji u svakoj točki nama poznatih protežnih dimenzija, upravo kao što svaka od dimenzija gore-dolje, lijevo-desno i naprijed-natrag također postoji u svakoj točki. To je nov i neovisan smjer kojim bi mogao krenuti mrav kad bi bio dovoljno malen. Da bismo odredili prostornu lokaciju takvog

mikroskopskog mrava, morali bismo reći gdje se nalazi u tri poznate nam protežne dimenzije (predstavljene mrežom), a također i gdje se nalazi u kružnoj dimenziji. Trebala bi nam četiri prostorna podatka; ako dodamo i vrijeme, dobivamo zbroj od pet prostorno-vremenskih podataka – jedan više nego što bismo inače očekivali.

I tako, prilično iznenađujuće, vidimo da iako smo svjesni samo triju protežnih prostornih dimenzija, logika Kaluze i Kleina pokazuje da to ne isključuje postojanje dodatnih, uvijenih dimenzija, barem ako su vrlo malene. Univerzum možda ima više dimenzija nego što ih oko vidi.

Koliko maleno je "maleno"? Avangardna oprema može detektirati strukture malene poput milijardinke milijardinke metra. Ako je dodatna dimenzija uvijena do veličine manje od te sićušne razdaljine, premalena je da bismo je detektirali. Klein je 1926. kombinirao Kaluzin početni prijedlog s nekim zamislima s nastajućeg polja kvantne mehanike. Njegovi izračuni naznačili su da bi dodatna kružna dimenzija

mogla biti malena poput Planckove duljine, mnogo kraća nego što bi bilo dostupno eksperimentima. Mogućnost dodatnih, sićušnih dimenzija fizičari otad zovu *Kaluza-Kleinova teorija.*[2]

---

[2] Začudo, fizičari Savas Dimopoulos, Nima Arkani-Hamed i Gia Dvali, na temelju ranijih spoznaja Ignatiosa Antoniadisa i Josepha Lykkena, istaknuli su da čak i kad bi dodatne, uvijene dimenzije bile dugačke čak i milimetar, moguće je da ne bi bile otkrivene eksperimentima. Razlog tome je taj što akceleratori čestica sondiraju mikrosvijet služeći se jakom, slabom i elektromagnetskom silom. Gravitacijska sila, budući da je nevjerojatno slaba na tehnologijom dostupnim energijama, uglavnom se zanemaruje. No Dimopoulos i suradnici napominju da ako dodatna, uvijena dimenzija utječe prije svega na gravitacijsku silu (a pokazuje se da je to posve vjerojatno u teoriji struna), svi postojeći eksperimenti mogli su je previdjeti. Novi, visokoosjetljivi gravitacijski eksperimenti u bliskoj budućnosti potražit će takve, "velike" uvijene dimenzije. Pozitivan rezultat bio bi jedno od najvećih otkrića svih vremena.

Promet na vrtnom crijevu

Opipljiv primjer vrtnog crijeva i ilustracija na slici 8.3 trebala bi nam dati određeni dojam o tome kako je moguće da naš univerzum ima dodatne prostorne dimenzije. No čak i istraživačima na tom području teško je vizualizirati univerzum s više od tri prostorne dimenzije. Fizičari zbog toga često bruse svoju intuiciju o dodatnim dimenzijama razmišljajući o tome kako bi život izgledao kad bismo živjeli u imaginarnom univerzumu s *manje* dimenzija – po uzoru na fantastično klasično popularizatorsko djelo *Plošnozemska*[3] Edwina Abbotta iz 1884. – u kojem ubrzo shvatimo da univerzum ima više dimenzija od onih kojih smo izravno svjesni. Upustimo se u to, zamišljajući dvodimenzionalni univerzum oblikovan poput našeg vrtnog crijeva. Da bi nam uspjelo, moramo odbaciti "izvanjsku" perspektivu iz koje se vrtno crijevo vidi kao predmet u našem univerzumu. Moramo napustiti svijet kakav poznajemo i ući u nov svijet

vrtnog crijeva u kojemu je površina vrlo dugačkog vrtnog crijeva (možemo zamisliti da je beskonačno dugačko) *sve što postoji*, to jest sve što se prostire. Zamislimo da smo maleni mrav koji živi svoj život na toj površini.

Počnimo zamislivši da su stvari još ekstremnije. Zamislimo da je duljina kružne dimenzije svijeta vrtnog crijeva vrlo malena – da je tako kratka da ni mi ni naši sustanari na vrtnom crijevu nismo svjesni da postoji. Umjesto toga, i mi svi ostali koji žive u svijetu vrtnog crijeva smatraju da je jedna osnovna životna činjenica tako očita da se ne može dovesti u pitanje: univerzum ima *jednu* prostornu dimenziju. (Kad bi svijet vrtnog crijeva imao svog mrava-Einsteina, njegovi stanovnici rekli bi da univerzum ima jednu prostornu i jednu vremensku dimenziju.) Zapravo, to svojstvo tako je očito da su stanovnici crijeva nazvali svoj svijet *Cr-*

---

[3] Edwin Abbott, *Flatland* (Princeton: Princeton University Press, 1991). Usp. *Plošnozemska* (Step Press, Zagreb, 2005).

tozemska, izravno naglasivši da ima jednu prostornu dimenziju.

Život u Crtozemskoj znatno se razlikuje od života kakav poznajemo. Na primjer, tijelo kakvo poznajemo *ne stane* u Crtozemsku. Koliko god truda ulagali u teretani, nikako ne možemo izbjeći činjenicu da definitivno imamo duljinu, širinu i dubinu – protežnosti u tri dimenzije. U Crtozemskoj nema mjesta za tako ekstravagantnu raskoš. Prisjetimo se da, iako je naša mentalna slika Crtozemske povezana s dugačkim predmetom nalik na uže koji postoji u našem prostoru, Crtozemsku zapravo trebamo shvatiti kao *univerzum* – sve što postoji. Kao stanovnici Crtozemske, moramo stati u njegovu prostornu protežnost. Pokušajmo to zamisliti. Čak i ako poprimimo mravlje tijelo, nećemo stati. Mravlje tijelo morat ćemo stisnuti tako da više nalikuje na crva, a zatim ga još pritiskati sve dok uopće ne bude imalo debljinu. Da bismo se uklopili u Crtozemsku, moramo postati biće koje ima *samo* duljinu.

Nadalje zamislimo da na oba kraja tijela imamo po jedno oko. Za razliku od ljudskih očiju, koje se pokreću i gledaju u sve tri dimenzije, naše oči Crtobića zauvijek su fiksirane i gledaju u jednodimenzionalnu daljinu. To *nije* anatomsko ograničenje našeg novog tijela. Ne, nego mi i sva druga Crtobića shvaćamo da Crtozemska ima samo jednu dimenziju i jednostavno nema nikakvog drugog smjera u kojemu bi nam oči gledale. Naprijed i natrag – to je sva protežnost Crtozemske.

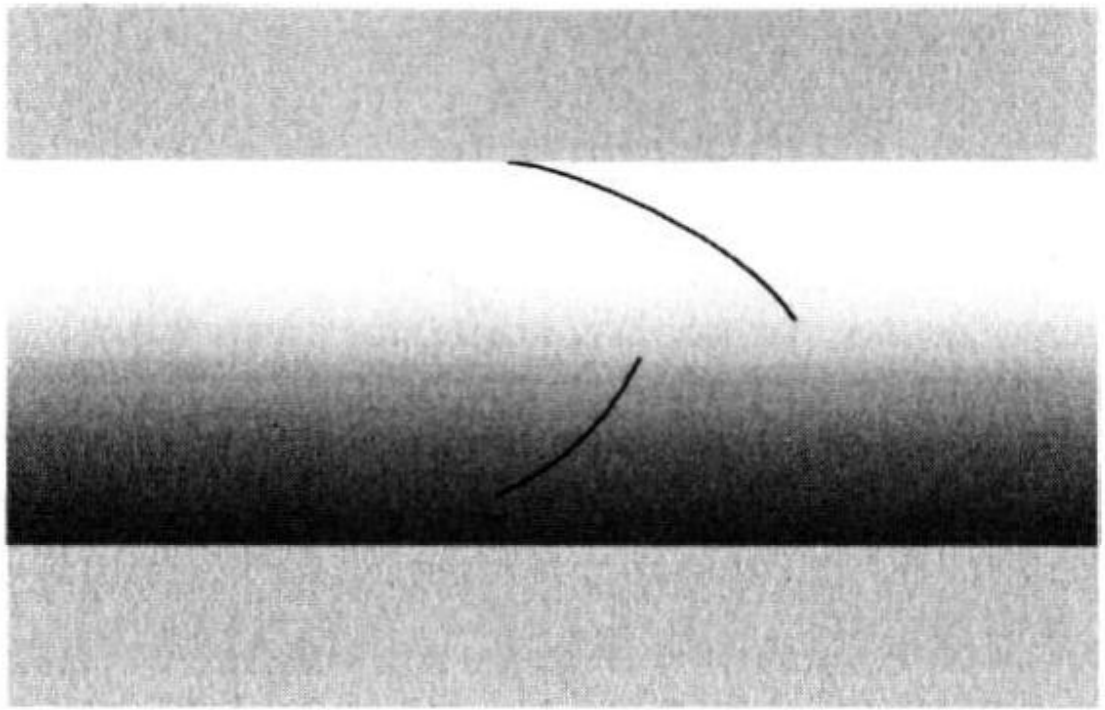
Možemo pokušati dalje zamišljati život u Crtozemskoj, ali ubrzo ćemo shvatiti da niti ne postoji mnogo toga. Na primjer, kad je drugo Crtobiće pokraj nas, zamislimo kako bi to izgledalo: vidjet ćemo jedno njegovo oko – ono koje je okrenuto prema nama – ali za razliku od ljudskih očiju, njegovo će biti jedna točka. Oči u Crtozemskoj nemaju nikakvih obilježja i ne pokazuju nikakve osjećaje – naprosto nema mjesta za te poznate nam karakteristike. Štoviše, zauvi-

jek ćemo biti osuđeni na tu točkastu sliku oka našeg bližnjeg. Ako bismo htjeli proći pokraj njega i istraživati Crtozemsku s druge strane njegova tijela, čekalo bi nas teško razočaranje. Ne možemo proći pokraj njega. On "blokira cijelu cestu" i u Crtozemskoj nema prostora da ga se zaobiđe. Poredak Crtobića ne može se promijeniti – ona ostaju zauvijek jednako raspoređena uzduž Crtozemske. Kakva dosada.

Nekoliko tisuća godina nakon bogojavljenja u Crtozemskoj, Crtobiće imenom Kaluza Linić ponudilo je malo nade potištenim stanovnicima Crtozemske. Možda iz božanskog nadahnuća, a možda iz pukog očaja nakon silnih godina zurenja u susjedovo oko, sugerirao je da Crtozemska na kraju možda ipak nije jednodimenzionalna. Počeo je teoretizirati: što ako je Crtozemska zapravo dvodimenzionalna, a druga dimenzija je vrlo malen kružni smjer koji je dosad izbjegavao izravnu detekciju zbog svoje sićušne prostorne protežnosti. Ne zaustavlja se na tome nego ocrtava obrise novog, prostranog života, kad bi se samo taj zamotani smjer prote-

gnuo – a to je moguće, barem ako je suditi po novom radu njegova kolege Linisteina. Kaluza Linić opisuje univerzum koji zadivljuje vas i vaše supatnike i sve vas puni nadom – univerzum u kojemu Crtobića mogu slobodno preskakivati jedna druge služeći se drugom dimenzijom: to je kraj prostornog ropstva. Shvaćamo da Kaluza Linić opisuje život u "podebljanom" univerzumu vrtnoga crijeva.

Zapravo, kad bi kružna dimenzija narasla i "napuhnula" Crtozemsku u univerzum vrtnoga crijeva, život bi vam se iz temelja promijenio. Uzmimo za primjer vaše tijelo. Budući da ste Crtobiće, sve između vaša dva oka je utroba vašeg tijela. Stoga vaše oči igraju istu ulogu u vašem crtotijelu koju u običnom ljudskom tijelu ima koža: one su prepreka između unutrašnjosti vašeg tijela i vanjskoga svijeta. Liječnik u Crtozemskoj može ući u unutrašnjost vašeg crtotijela samo tako da mu probuši površinu – drugim riječima, "kirurgija" u Crtozemskoj odvija se kroz oči.

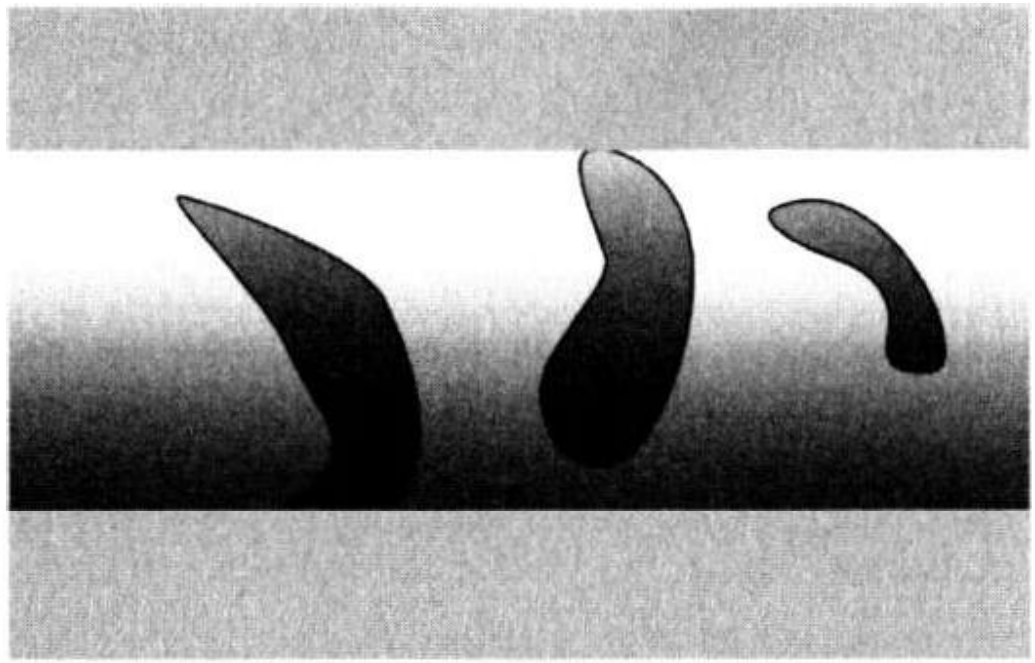


Slika 8.5 Kad se Crtozemska proširi u univerzum vrtnog crijeva, jedno Crtobiće vidi izravno u utrobu drugog tijela.

A sada zamislimo što se događa ako Crtozemska ima tajnu, smotanu dimenziju, i ako se ta dimenzija proširi do dovoljne veličine da bude uočljiva. Sada vam Crtobiće može vidjeti tijelo pod kutom i tako vam izravno vidjeti u utrobu, što smo ilustrirali na slici 8.5. Služeći se tom drugom dimenzijom, liječnik može operirati posežući izravno u vašu izloženu utro-

bu. Nečuveno! Crtobića će s vremenom nedvojbeno razviti prekrivač nalik na kožu kako bi zaštitila novoizloženu utrobu svog tijela od dodira s vanjskim svijetom. Štoviše, zacijelo će evoluirati u bića koja imaju i širinu kao i duljinu: Ravnobića koja kližu po dvodimenzionalnom univerzumu vrtnog crijeva kao što je ilustrirano na slici 8.6. Kad bi se kružna dimenzija proširila do velikih razmjera, taj dvodimenzionalni univerzum bio bi vrlo sličan Abbottovoj Plošnozemskoj – imaginarnom dvodimenzionalnom svijetu koji je Abbott prožeo bogatim kulturnim naslijeđem, pa čak i satiričkim kastinskim sustavom zasnovanim na geometrijskom obliku tijela. Premda je teško zamisliti da se u Crtozemskoj događa *išta* zanimljivo – naprosto nema dovoljno prostora – život u vrtnom crijevu buja raznim mogućnostima. Prijelaz s jedne uočljivo velike dimenzije na dvije vrlo je dramatičan.

A sada ponovimo refren: zašto stati na tome? I sam dvodimenzionalni univerzum mogao bi imati uvijenu dimenziju te stoga potajno biti trodimenzionalan. To možemo



Slika 8.6 Ravna, dvodimenzionalna bića koja žive u univerzumu vrtnog crijeva.

ilustrirati slikom 8.4, ali moramo biti svjesni da sada zamišljamo da postoje samo *dvije* protežne prostorne dimenzije (kad smo predstavili tu ilustraciju zamišljali smo da ravna mreža predstavlja tri protežne dimenzije). Međutim, biće se može gibati i u trećoj dimenziji – smjeru "gore-dolje" uzduž po krugu. Zapravo, kad bi kružna dimenzija narasla u dovolinoj mjeri, to bi mogao biti naš trodimenzionalni univer-

zum. Zasad ne znamo da li se ijedna od naše tri prostorne dimenzije prostire u beskonačnost ili se zapravo uvija natrag u sebe, u obliku divovskoga kruga, onkraj dometa naših najjačih teleskopa. Kad bi kružna dimenzija na slici 8.4 postala dovoljno velika – i protezala se milijardama svjetlosnih godina – i ta slika mogla bi biti crtež našeg svijeta.

No, refren se ponavlja: zašto stati na tome? To nas dovodi do vizije Kaluze i Kleina: naš trodimenzionalni univerzum mogao bi imati dosad neočekivanu, uvijenu četvrtu prostornu dimenziju. Ako je ta iznenađujuća mogućnost, ili njena generalizacija na brojne uvijene dimenzije (o čemu ćemo uskoro raspraviti), istinita, i kad bi se te uvijene dimenzije proširile do makroskopske veličine, gore izloženi niže-dimenzionalni primjeri objašnjavaju nam kako bi se život kakav poznajemo mogao promijeniti u golemoj mjeri.

No, začudo, čak i ako zauvijek ostanu uvijene i malene, postojanje dodatnih, uvijenih dimenzija ima važne implikacije.

Ujedinjenje u višim dimenzijama

Iako je Kaluzina sugestija iz 1919. da bi naš univerzum mogao imati više prostornih dimenzija od onih kojih smo izravno svjesni bila važna mogućnost sama po sebi, privlačna je postala zbog nečeg drugog. Einstein je formulirao opću teoriju relativnosti u poznatom okolišu univerzuma s tri prostorne i jednom vremenskom dimenzijom. No, matematički formalizam njegove teorije može se izravno proširiti tako da se napiše analogne jednadžbe za univerzum s dodatnim prostornim dimenzijama. Uz "skromnu" pretpostavku jedne dodatne prostorne dimenzije, Kaluza je proveo matematičku analizu i eksplicitno izveo nove jednadžbe.

Otkrio je da su u revidiranoj formulaciji jednadžbe koje se odnose na tri obične dimenzije u biti jednake Einsteinovim. No budući da je uključio dodatnu prostornu dimenziju, ne iznenađuje da je Kaluza iznašao dodatne jednadžbe

u odnosu na one koje je prvotno izveo Einstein. Proučivši dodatne jednadžbe povezane s novom dimenzijom, Kaluza je shvatio da se događa nešto čudesno. Dodatne jednadžbe nisu bile ništa drugo nego one koje je Maxwell napisao 1880-ih za opis elektromagnetske sile! Dodavši još jednu prostornu dimenziju, Kaluza je ujedinio Einsteinovu teoriju gravitacije s Maxwellovom teorijom svjetlosti.

Prije Kaluzine sugestije smatralo se da su gravitacija i elektromagnetizam dvije nepovezane sile; nije bilo nikakve naznake da među njima možda postoji nekakav odnos. Imajući dovoljno hrabrosti i kreativnosti da zamisli da naš univerzum ima dodatnu prostornu dimenziju, Kaluza je sugerirao da postoji itekako duboka povezanost. Njegova je teorija tvrdila da su i gravitacija i elektromagnetizam povezani s mreškanjem u tkivu prostora. Gravitaciju prenosi mreškanje u poznate nam tri dimenzije, dok elektromagnetizam prenosi mreškanje u novoj, uvijenoj dimenziji.

Kaluza je poslao svoj članak Einsteinu, i Einstein je isprva bio vrlo zainteresiran. Dana 21. travnja 1919. otpisao je Kaluzi i rekao mu da nikad nije pomislio da bi se ujedinjenje moglo postići "petodimenzionalnim [četiri prostorne i jedna vremenska] cilindričnim svijetom ". Dodao je: "Na prvi pogled, vaša zamisao veoma mi se sviđa."[4] No nakon tjedan dana Einstein je ponovno pisao Kaluzi, ovaj put s određenom skepsom: "Proučavao sam vaš članak i vrlo mi je zanimljiv. Zasad nigdje ne vidim nemogućnost. S druge strane, moram priznati da se dosad izneseni argumenti ne doimaju dovoljno uvjerljivima."[5] Ali potom, 14. listopada 1921, nakon više od dvije godine, Einstein još jednom piše Kaluzi jer je imao dovoljno vremena da potpunije proradi Kaluzin pristup: "Predomislio sam se u vezi s tim što sam vas spriječio da objavite svoju zamisao o ujedinjenju gravitacije i elektriciteta... Ako želite, ipak ću predstaviti vaš rad na akademiji."[6] Kaluza je sa zakašnjenjem napokon dobio majstorov pečat s potvrdom.

Premda je to bila prelijepa zamisao, kasnija detaljna proučavanja Kaluzina prijedloga, potkrijepljena Kleinovim prilozima, pokazala su da je on u ozbiljnom sukobu s podacima iz eksperimenata. Najjednostavniji pokušaji da se elektron uključi u teoriju predviđali su odnose između njegove mase i naboja koji su bili znatno drukčiji od izmjerenih vrijednosti. Budući da se činilo kako nema očitog načina da se taj problem zaobiđe, mnogi fizičari koji su bili uočili Kaluzinu zamisao prestali su se zanimati za nju. Einstein i drugi i dalje su se povremeno bavili mogućnošću dodatnih, uvijenih

---

4 A. Einstein u pismu T. Kaluzi, citiran u: Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), str. 330.

5 A. Einstein u pismu T. Kaluzi, citiran u: D. Freedman i P. van Nieuwenhuisen, "The Hidden Dimensions of Spacetime", *Scientific American* 252(1985), 62.

6 Ibid.

dimenzija, ali ona je vrlo brzo bila potisnuta na margine teorijske fizike.

Kaluzina zamisao u stvarnom je smislu bila ispred svog vremena. Treće desetljeće prošlog stoljeća označilo je nastanak bogata tržišta za teorijsku i eksperimentalnu fiziku koja se bavila temeljnim zakonima mikrosvijeta. Teoretičari su imali pune ruke posla razvijajući strukturu kvantne mehanike i kvantne teorije polja. Eksperimentatori su trebali istražiti detaljna svojstva atoma, kao i mnogih drugih elementarnih sastojaka materije. Teorija je usmjeravala eksperimente, a eksperimenti su usavršavali teoriju; nakon pola stoljeća fizičarskog truda otkriven je standardni model. Nije čudo što su u tim plodnim vremenima, punim zanosa, spekulacije o dodatnim dimenzijama bile u dalekom drugom planu. Dok su fizičari iskušavali moćnu kvantnu metodologiju, čije implikacije su davale provjerljiva predviđanja, bilo je malo interesa za mogućnost da bi univerzum mogao biti znatno drukčiji, i to u razmjerima premalenim da bi ih se

sondiralo čak i najsnažnijim instrumentima.

No, svako tržište prije ili kasnije posustane. Krajem 1960-ih i početkom 1970-ih teorijska struktura standardnog modela bila je dovršena. Krajem 1970-ih i početkom 1980-ih mnoga njegova predviđanja potvrđena su eksperimentima i većina fizičara čestica zaključila je da će s vremenom biti potvrđena i ostala. Iako je nekoliko važnih pojedinosti ostalo nerazriješeno, mnogi su smatrali da su glavna pitanja o jakoj, slaboj i elektromagnetskoj sili dobila odgovore.

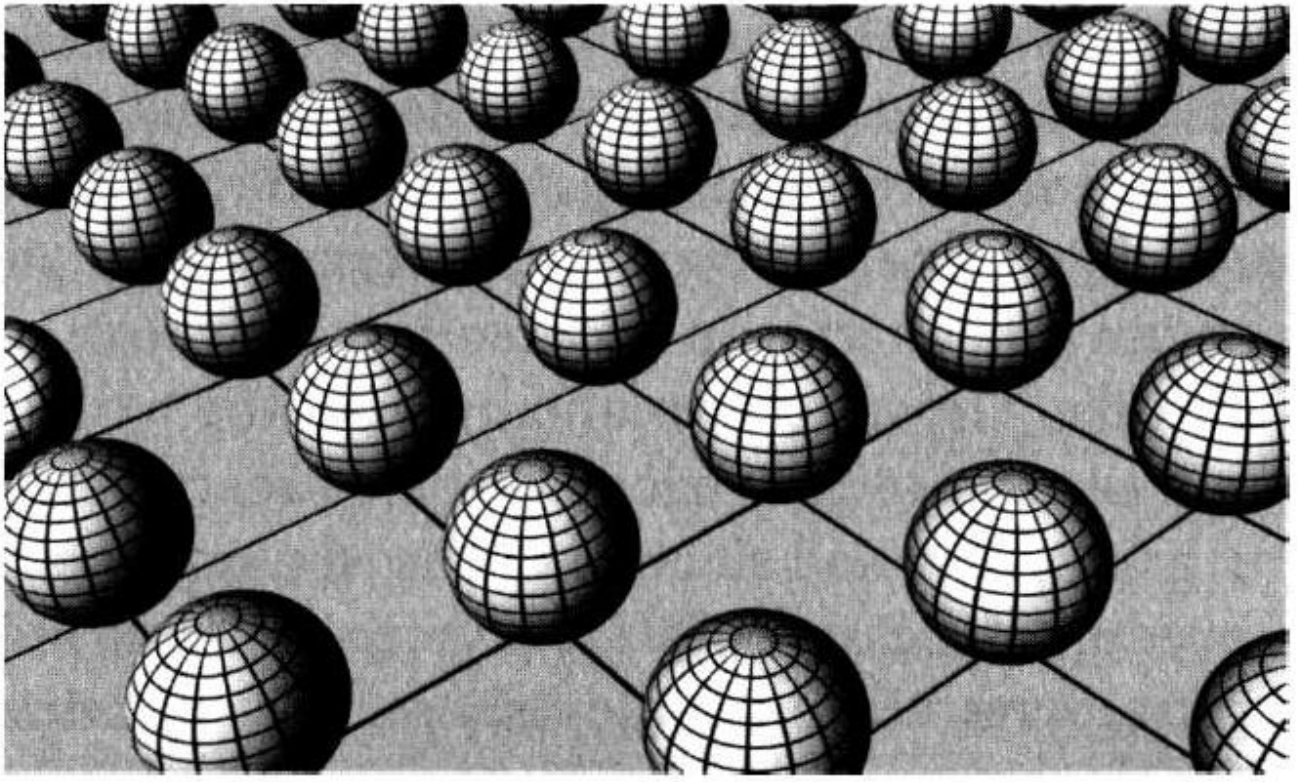
Sazrelo je vrijeme za povratak najvećem od svih pitanja: zagonetnom sukobu između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. Uspjeh u formuliranju kvantne teorije triju prirodnih sila ohrabrio je fizičare da pokušaju privesti jatu i četvrtu, gravitaciju. Kad su bez uspjeha iskušane brojne zamisli, zajednica fizičara postala je otvorenija prema radikalnijim pristupima. Nakon što je krajem 1920-ih ostavljena ležati kao da je mrtva, Kaluza-Kleinova teorija oživjela je.

Moderna Kaluza-Kleinova teorija

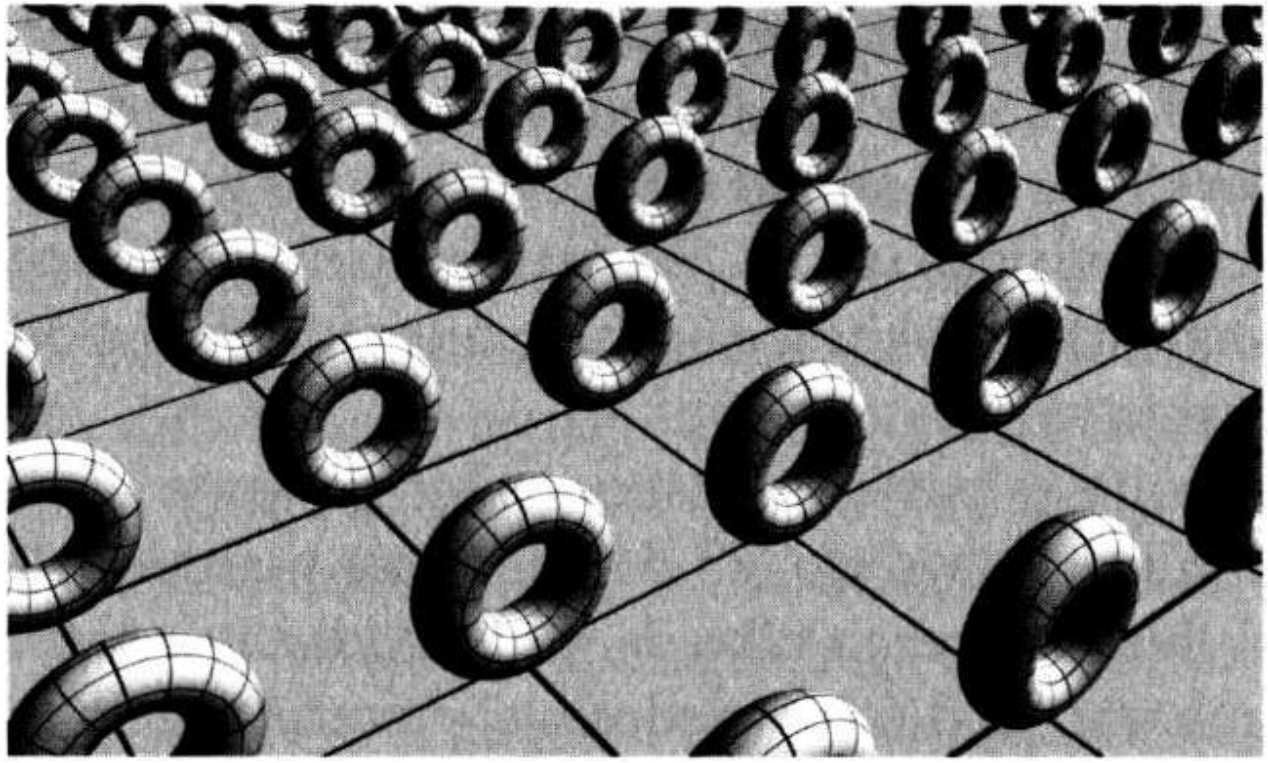
Razumijevanje fizike znatno se promijenilo i produbilo u šest desetljeća nakon originalnog Kaluzinog prijedloga. Kvantna mehanika u potpunosti je formulirana i provjerena eksperimentima. Otkrivene su jaka i slaba sila, nepoznate 1920-ih, i u dobroj mjeri je ostvareno njihovo razumijevanje. Neki fizičari sugerirali su da Kaluzina prva verzija nije uspjela jer on nije znao za te druge sile i stoga je odviše *konzervativno* preustrojio prostor. Više sila znači potrebu za još više dimenzija. Tvrdilo se da jedna nova kružna dimenzija, iako je naznačila povezanost između opće relativnosti i elektromagnetizma, jednostavno nije dovoljna.

Krajem 1970-ih trajao je intenzivan istraživački proces, usmjeren na višedimenzionalne teorije s brojnim uvijenim prostornim smjerovima. Slika 8.7 ilustracija je primjera s dvjema dodatnim dimenzijama koje su zavijene u površinu kugle – to jest, sfere. Kao i u slučaju jedne kružne dimenzi-

kugle – to jest, sfere. Kao i u slučaju jedne kružne dimenzije, te dodatne dimenzije izviru iz *svake točke* poznatih nam, protežnih dimenzija. (Radi vizualne jasnoće opet smo nacrtali samo ilustrativan uzorak sfernih dimenzija na podjednako razmaknutim presjecištima u protežnim dimenzijama.) Osim predlaganja različitog broja dodatnih dimenzija,



Slika 8.7 Dvije dodatne dimenzije zavijene u oblik sfere.



Slika 8.8 Dvije dodatne dimenzije, zavijene u oblik praznog uštipka, ili torusa.

možemo zamisliti i druge oblike tih dimenzija. Na primjer, na slici 8.8 ilustriramo mogućnost u kojoj ponovno postoje dvije dodatne dimenzije, sada u obliku praznog uštipka – to jest, torusa. Iako ih ne možemo nacrtati, možemo zamisliti i zamršenije mogućnosti, u kojima postoje tri, četiri, pet ili

zapravo bilo koji broj dodatnih prostornih dimenzija, zavijenih u širok raspon egzotičnih oblika. Glavni zahtjev i tu glasi da sve te dimenzije imaju prostornu protežnost manju od najmanje duljine koju možemo sondirati, jer nijedan eksperiment još nije otkrio da postoje.

Od tih višedimenzionalnih prijedloga najviše su obećavali oni koji su uključivali i supersimetriju. Fizičari su se nadali da bi djelomično poništavanje najjačih kvantnih fluktuacija, do kojeg dolazi sparivanjem superpartnerskih čestica, moglo pomoći da se ublaže napetosti između gravitacije i kvantne mehanike. Skovali su izraz *višedimenzionalna supergravitacija* kako bi opisali te teorije koje obuhvaćaju gravitaciju, dodatne dimenzije i supersimetriju.

Kao što je bio slučaj i s originalnim Kaluzinim pokušajem, razne verzije višedimenzionalne supergravitacije isprva su mnogo obećavale. Nove jednadžbe, nastale na temelju dodatnih dimenzija, jako su nalikovale onima koje služe u opisu elektromagnetizma, te jake i slabe sile. No, kad su ih

pobliže istražili, pojavile su se stare zagonetke. Najvažnija od svih bilo je to što supersimetrija ublažava one opake kvantne titraje na kratkim udaljenostima, ali ne dovoljno da bi nastala smislena teorija. Fizičarima je bilo teško i pronaći jednu smislenu višedimenzionalnu teoriju koja bi uključivala sva svojstva sila i materije.[7]

Postupno je postajalo jasno da komponente ujedinjene teorije izlaze na vidjelo, ali da nedostaje presudni element koji bi ih sve povezao tako da budu uskladive s kvantnom mehanikom. Taj dio koji nedostaje – teorija struna – 1984. dramatično je stupila na pozornicu i zauzela najvažnije mjesto na njoj.

---

[7] Fizičari su otkrili da najjproblematičnije svojstvo standardnog modela za uključivanje u višedimenzionalnu formulaciju jest *kiralnost*. Taj pojam nismo obradili u glavnom tekstu da ne bismo preopteretili raspravu, pa ćemo to učiniti ovdje za zaninteresirana čitatelja. Zamislimo da vam netko prikaže film određenog znanstvenog eksperimenta i suoči vas s neobičnim izazovom da odredite je li

eksperiment na filmu snimljen izravno ili je snimljen njegov odraz u zrcalu. Budući da je snimatelj bio stručan, nema nikakvih znakova je li upotrijebljeno zrcalo ili nije. Jeste li dorasli tom izazovu? Sredinom 1950-ih su teorijske spoznaje T. D. Leeja i C. N. Younga i rezultati eksperimenata C. S. Wua i suradnika pokazali da jeste dorasli, ali samo ako je snimljen prikladan eksperiment. Naime, njihovim radom ustanovljeno je da zakoni prirode nisu savršeno zrcalno simetrični u smislu da se u zrcalu odražene verzije nekih procesa – one koje izravno ovise o slaboj sili – *ne mogu dogoditi u našem svijetu*, premda se izvorni, procesima mogu. I tako, dok gledate film, ako vidite da se odvija neki od tih, zabranjenih procesa, znat ćete da promatrate u zrcalu odraženu sliku eksperimenta, a ne eksperimenta samoga. Budući da se u zrcalu preokreće lijevo i desno, rad Leeja, Yanga i Wua otkrio je da univerzum nije savršeno simetričan u dimenziji lijevo-desno – rečeno stručnim jezikom, univerzum je *kiralan*. To svojstvo standardnog modela (posebno slabe sile) fizičarima je gotovo nemoguće uključiti u višedimenzionalni supergravitacijski okvir. Kako bismo izbjegli zbrku, napominjemo da ćemo u poglavlju 10 raspravljati pojam u teoriji struna, poznat kao "zrcalna simetrija", ali riječ "zrcalna" u tom kontekstu upotrebljavamo na posve drukčiji način nego ovdje.

Sad biste već trebali biti uvjereni da univerzum može imati dodatne, uvijene prostorne dimenzije; ako su doista tako malene, barem ih ništa ne isključuje. Samo, možda vam te dodatne dimenzije ostavljaju dojam artificijelnosti. Kad već nismo sposobni sondirati red veličine manji od milijardinke milijardinke metra, onda možemo zamišljati ne samo dodatne sićušne dimenzije nego i svakojake čudnovate mogućnosti – pa čak i mikroskopsku civilizaciju u kojoj žive još manji zeleni ljudi. Iako je prva mogućnost racionalno motivirana, a druga baš i nije, čin postuliranja prve eksperimentima nepotvrđene, a zasad i neprovjerljive mogućnosti može se doimati jednako proizvoljnim kao i postuliranje druge.

Tako je bilo sve do teorije struna. Ta teorija razrješava glavni problem s kojim se suočava suvremena fizika – neusklađivost kvantne mehanike i opće teorije relativnosti – i

ujedinjuje naše razumijevanje svih fundamentalnih materijalnih sastavnica i sila prirode. No da bi ostvarila ta postignuća, pokazalo se da teorija struna *zahtijeva* da univerzum ima dodatne prostorne dimenzije.

Evo zašto je tako. Jedna od glavnih spoznaja kvantne mehanike glasi da je moć našeg predviđanja fundamentalno ograničena na tvrdnju da će to takvog-i-takvog ishoda doći s tom-i-tom vjerojatnošću. Premda je Einstein mislio da je to vrlo neugodno obilježje našeg modernog razumijevanja, a vi se možda i slažete s njim, to je naprosto tako. Prihvatimo to. Svi znamo da je vjerojatnost broj između 0 i 1 – a kad se izrazi kao postotak, vjerojatnost je broj između 0 i 100. Fizičari su uvidjeli da je glavni znak da je neka kvantnomehanička teorija pošla krivim putem to što neki izračuni daju "vjerojatnosti" koje *nisu* unutar tog, prihvatljivog raspona. Na primjer, ranije smo spomenuli da su beskonačne vjerojatnosti u izračunima u okviru točkastih čestica

znak nepodnošljive neuskladivosti opće teorije relativnosti i kvantne mehanike. Kao što smo rekli, teorija struna uklanja te beskonačnosti. No dosad nismo spomenuli da ostaje još jedan, istančaniji problem. U ranim danima teorije struna fizičari su otkrili da neki proračuni daju *negativne* vjerojatnosti, koje su također izvan prihvatljivog raspona. Dakle, na prvi pogled činilo se da je teorija struna zapela u svom vlastitom kvantnomehaničkom živom pijesku.

Fizičari su tvrdoglavom odlučnošću tražili i pronašli uzrok tog neprihvatljivog svojstva. Objašnjenje počinje jednostavnim opažanjem. Ako je struna ograničena na to da leži na dvodimenzionalnoj površini – poput površine stola ili vrtnoga crijeva – broj neovisnih smjerova u kojima može vibrirati sveden je na *dva*: dimenzije lijevo-desno i naprijed-natrag na površini. Svaki titrajni model koji ostaje na površini sadrži neku kombinaciju vibracija u ta dva smjera. U skladu s tim, vidimo da to znači da je struna u Plošnozemskoj, u univerzumu vrtnoga crijeva, kao i u svakom drugom

dvodimenzionalnom univerzumu, također ograničena na to da titra u ukupno dva neovisna prostorna smjera. No ako se struna može odvojiti od površine, broj neovisnih smjerova titranja povećava se na tri, jer sad struna može oscilirati i u smjeru gore-dolje. Ekvivalentno tome, u univerzumu s tri prostorne dimenzije struna može titrati u tri neovisna smjera. Ta logika se može i nastaviti, premda je to teže zamisliti: u univerzumu s još više prostornih dimenzija još je više neovisnih smjerova u kojima može vibrirati.

Tu činjenicu o titrajima struna ističemo zato što su fizičari otkrili da su oni problematični proračuni bili vrlo osjetljivi na broj neovisnih smjerova u kojima struna može titrati. Negativne vjerojatnosti nastale su zbog nepoklapanja između zahtjeva teorije i onoga što je nametala stvarnost: proračuni su pokazali sljedeće: kad bi strune titrale u *devet* neovisnih prostornih smjerova, sve negativne vjerojatnosti bi se poništile. Dobro, to izvrsno zvuči u teoriji, ali što onda?

Ako bi teorija struna trebala opisivati naš svijet, koji ima tri prostorne dimenzije, onda smo i dalje u nevolji.

No, jesmo li? Povedemo li se za više od osamdeset godina starom idejom, vidimo da Kaluza i Klein nude izlaz. Budući da su strune tako malene, ne samo da mogu titrati u velikim, protežnim dimenzijama, nego i u onima koje su sićušne i uvijene. I tako možemo zadovoljiti zahtjev teorije struna o devet dimenzija u našem univerzumu ako pretpostavimo – u stilu Kaluze i Kleina – da osim poznatih triju protežnih prostornih dimenzija postoji još šest drugih, uvijenih prostornih dimenzija. Tako je spašena teorija struna kada se činilo da je na rubu eliminacije iz područja znanstvene relevantnosti. Štoviše, umjesto da samo postulira postojanje dodatnih dimenzija, kao što su činili Kaluza, Klein i njihovi sljedbenici, teorija struna ih *zahtijeva*. Da bi teorija struna imala smisla, univerzum bi morao imati devet prostornih i jednu vremensku dimenziju – ukupno deset dimenzija. Tako je Kaluzin prijedlog iz 1919. dobio svoj najuvjerljiviji i

najsnažniji oblik.

Neka pitanja

Tako se nameće više pitanja. Prvo, zašto teorija struna zahtijeva točno devet prostornih dimenzija kako bi se izbjegle besmislene vjerojatnosti? Od svih pitanja u teoriji struna na to je vjerojatno najteže odgovoriti bez pozivanja na matematički formalizam. Proračuni u teoriji struna daju taj rezultat, ali nitko nema intuitivno, laičko objašnjenje zašto se pojavljuje baš taj broj dimenzija. Fizičar Ernest Rutherford jednom je rekao da, u biti, ako ne možete objasniti neki rezultat tako da bude razumljiv i laiku, onda ga zapravo ne razumijete. Time nije želio reći da je vaš rezultat pogrešan; želio je reći da to znači da ne razumijete u potpunosti njegovo porijeklo, značenje i implikacije. Možda to vrijedi i za

dodatne dimenzije u teoriji struna. (Zapravo, iskoristimo ovu priliku da se pripremimo za glavni aspekt druge revolucije superstruna o kojoj ćemo raspravljati u poglavlju 12. Pokazalo se da je proračun koji je bio u osnovi zaključka da postoji deset prostornovremenskih dimenzija – devet prostornih i jedna vremenska – tek aproksimativan. Sredinom 1990-ih je Witten, na temelju vlastitih spoznaja i prethodnog rada Michaela Duffa s Državnog sveučilišta Texas i Chrisa Hulla i Paula Townsenda sa sveučilišta Cambridge, ponudio uvjerljive dokaze da taj približni proračun zapravo *izostavlja* jednu prostornu dimenziju. Na iznenađenje većine teoretičara, ustvrdio je da teorija struna zapravo zahtijeva *deset* prostornih i jednu vremensku dimenziju, što ukupno daje jedanaest dimenzija. Taj važan rezultat ignorirat ćemo do poglavlja 12 jer on neće imati izravna utjecaja na građu koju ćemo izlagati prije toga.)

Drugo, ako jednadžbe teorije struna (preciznije rečeno, aproksimativne jednadžbe na kojima temeljimo svoju ra-

spravu prije poglavlja 12) pokazuju da univerzum ima devet prostornih dimenzija (i jednu vremensku), zašto su onda tri prostorne dimenzije (i jedna vremenska) velike, protežne, a sve ostale su sićušne i uvijene? Zašto nisu *sve* protežne, ili sve uvijene, ili nešto između te dvije mogućnosti? Zasad nitko ne zna odgovore na to pitanje. Ako je teorija struna ispravna, na kraju ćemo dobiti i taj odgovor, ali naše razumijevanje te teorije zasad nije dovoljno istančano da bismo ostvarili taj cilj. To ne znači da nije bilo hrabrih pokušaja da se dođe do objašnjenja. Na primjer, iz kozmološke perspektive možemo zamisliti da su sve dimenzije na početku bile čvrsto uvijene, a tada, u eksploziji nalik velikom prasku, tri prostorne i jedna vremenska dimenzija odvile su se i protegnule te postale kakve su danas, a ostale prostorne dimenzije ostale su malene. Izloženi su neki nerazrađeni argumenti u vezi s tim zašto su se protegnule samo tri dimenzije, što ćemo raspraviti u poglavlju 14, ali treba reći da su ta objaš-

njenja još "u povojima". U daljnjem tekstu pretpostavljat ćemo da su uvijene sve prostorne dimenzije osim tri, u skladu s onim što vidimo oko sebe. Glavni cilj modernih istraživanja je odrediti da li ta pretpostavka izrasta iz same teorije.

Treće, s obzirom na zahtjev o brojnim dodatnim dimenzijama, je li moguće da su neke od njih dodatne *vremenske* dimenzije, a ne prostorne? Ako razmislite o tome na trenutak, vidjet ćete da je to uistinu bizarna mogućnost. Svi mi posjedujemo gotovo tjelesno razumijevanje što to znači da univerzum ima više prostornih dimenzija jer živimo u svijetu u kojemu se neprekidno nosimo s dimenzijama – njih tri. No, što bi značilo imati više od jednog vremena? Bi li se jedno od njih poklopilo s vremenom kakvo doživljavamo psihološki dok bi drugo nekako bilo "drukčije"?

A kad počnete razmišljati o uvijenoj vremenskoj dimenziji, stvari postaju još čudnije. Na primjer, ako mrav krene dodatnom prostornom dimenzijom koja je uvijena poput kruga, uvijek iznova će dospijevati na isti položaj kad god

opiše potpun krug. To baš i nije veliko čudo jer smo navikli na to da se možemo vratiti na isto mjesto kad god to poželimo. Međutim, ako je uvijena dimenzija vremenska, prolaziti njome znači vratiti se, nakon određenog protoka vremena, *u neki prethodni trenutak*. Naravno, to zasigurno nadilazi svako naše iskustvo. Vrijeme kakvo poznajemo je dimenzija koju možemo prolaziti samo u jednom smjeru; to je apsolutno neizbježno i nikada se ne možemo vratiti ni u jedan prošli trenutak. Naravno, moglo bi biti da uvijene vremenske dimenzije imaju drukčija svojstva od poznate nam, goleme vremenske dimenzije o kojoj smatramo da se proteže od stvaranja univerzuma do sadašnjeg trenutka. No, za razliku od dodatnih prostornih dimenzija, nove i dosad nepoznate vremenske dimenzije zahtijevale bi još obuhvatniji preustroj naše intuicije. Neki teoretičari istražuju mogućnost uključivanja dodatnih vremenskih dimenzija u teoriju struna, ali to pitanje zasad je nerazriješeno. U našoj

raspravi o teoriji struna držat ćemo se "konvencionalnijeg" pristupa u kojem su sve uvijene dimenzije prostorne, ali intrigantna mogućnost novih vremenskih dimenzija mogla bi imati ulogu u budućim istraživanjima.

Fizikalne implikacije dodatnih dimenzija

Godine istraživanja, koje je počelo Kaluzinim člankom, pokazale su da iako dodatne dimenzije koje fizičari predlažu moraju biti manje nego što naša oprema može izravno "vidjeti" (jer ih ne vidimo), one imaju važne *neizravne* učinke na fizikalne procese koje možemo promatrati. Ta povezanost između mikroskopskih svojstava prostora i fizikalnih procesa koje promatramo posebno je uočljiva u teoriji struna.

Da bismo to razumjeli, moramo se prisjetiti da su masa i naboj čestice u teoriji struna određeni mogućim rezonantnim titrajnim modelima. Zamislite kako se sićušna struna

giba i oscilira i shvatit ćete da su rezonantni modeli određeni njenim prostornim okruženjem. Na primjer, zamislite oceanske valove. Na prostranstvima otvorenog oceana izolirani valni modeli relativno se slobodno formiraju i putuju na ovaj ili onaj način. To je nalik titrajnim modelima strune koja se giba velikim, protežnim prostornim dimenzijama. Kao u poglavlju 6, takva struna u svakom trenutku jednako je slobodna titrati u bilo kojem protežnom smjeru. No ako oceanski val prolazi kroz ispunjeniji prostor, oblik njegova valnog gibanja zasigurno će biti pod utjecajem, na primjer, dubine vode, rasporeda i oblika stijena na koje naiđe, kanala kroz koje se voda usmjerava i tako dalje. Ili, zamislimo cijev orgulja ili francuski rog. Zvuk koji ti instrumenti proizvode izravna je posljedica rezonantnih modela titranja stupova zraka u njihovoj unutrašnjosti; određen je preciznom veličinom i oblikom prostora unutar instrumenta kroz koji se struja zraka usmjerava. Uvijene prostorne dimenzije imaju sličan utjecaj na moguće titrajne obrasce strune. Budući

da sićušne strune titraju u svim prostornim dimenzijama, precizan način na koji su dodatne dimenzije zakovrčane i zavijene jedna na drugu snažno utječe i strogo ograničava moguće rezonantne titrajne obrasce. Ti obrasci, koje u velikoj mjeri određuje geometrija dodatnih dimenzija, čine matricu mogućih svojstava čestica promatranih u poznatim, protežnim dimenzijama. To znači da *geometrija dodatnih dimenzija određuje fundamentalne fizikalne atribute, kao što su masa i naboj čestice, koje promatramo u uobičajenim, velikim trima dimenzijama iz svoga iskustva.*

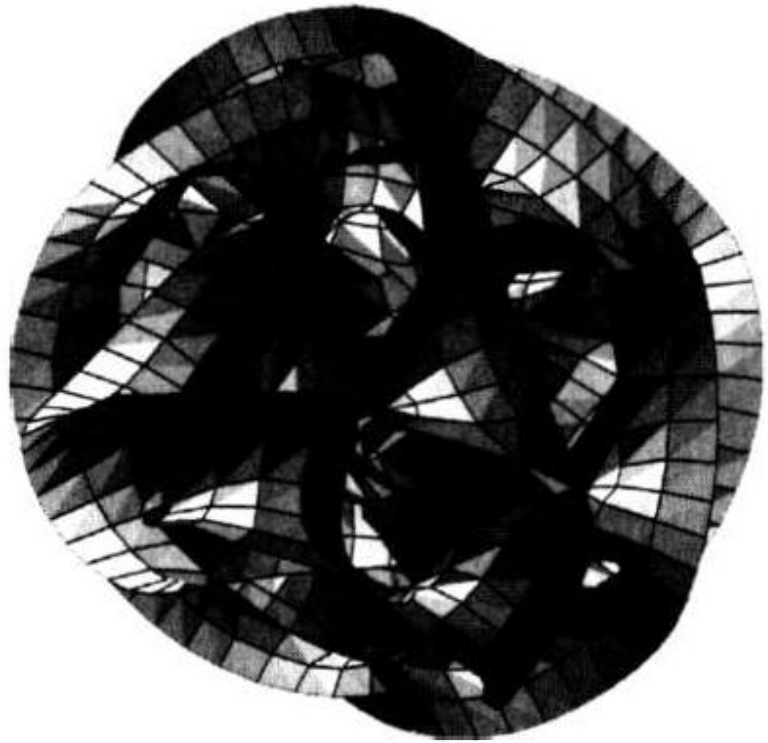
To je tako dalekosežna i važna tvrdnja da ćemo je ponoviti. Prema teoriji struna, univerzum je načinjen od sićušnih struna čiji su rezonantni modeli titranja mikroskopski izvor masa čestica i naboja sila. Teorija struna zahtijeva i dodatne prostorne dimenzije koje moraju biti uvijene do vrlo malih razmjera, kako bi objasnilo to što ih ne vidimo. No, sićušna struna može sondirati sićušan prostor. Kako se struna giba, i pritom titra, geometrijski oblik dodatnih dimenzija igra

kritičnu ulogu u određivanju rezonantnih modela titranja. Budući da modele titranja struna vidimo kao masu i naboj elementarnih čestica, zaključujemo da ta fundamentalna svojstva univerzuma u velikoj mjeri određuje geometrijska veličina i oblik dodatnih dimenzija. To je jedna od najdalekosežnijih spoznaja teorije struna.

Budući da dodatne dimenzije imaju tako dubok utjecaj na osnovna fizikalna svojstva univerzuma, trebali bismo krenuti u revnu potragu ne bismo li uspjeli razumjeti kako izgledaju te uvijene dimenzije.

Kako izgledaju uvijene dimenzije?

Dodatne dimenzije teorije struna ne možemo "zgužvati" kako nam se svidi; jednadžbe koje se izvode iz teorije strogo ograničavaju geometrijsku formu koju one mogu poprimiti. Philip Candelas s Teksaškog sveučilišta u Austinu, Gary



Slika 8.9 Primjer Calabi-Yauovog prostora.

Horowitz i Andrew Strominger s Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari i Edward Witten dokazali su da određena klasa šestodimenzionalnih geometrijskih oblika može zadovoljiti te uvjete. Nazivaju se Calabi-Yauovi prostori (ili Calabi-Yauovi oblici) u počast dvojici matematičara, Eugeniju Calabiju s Pensilvanijskog sveučilišta i Shing-Tung

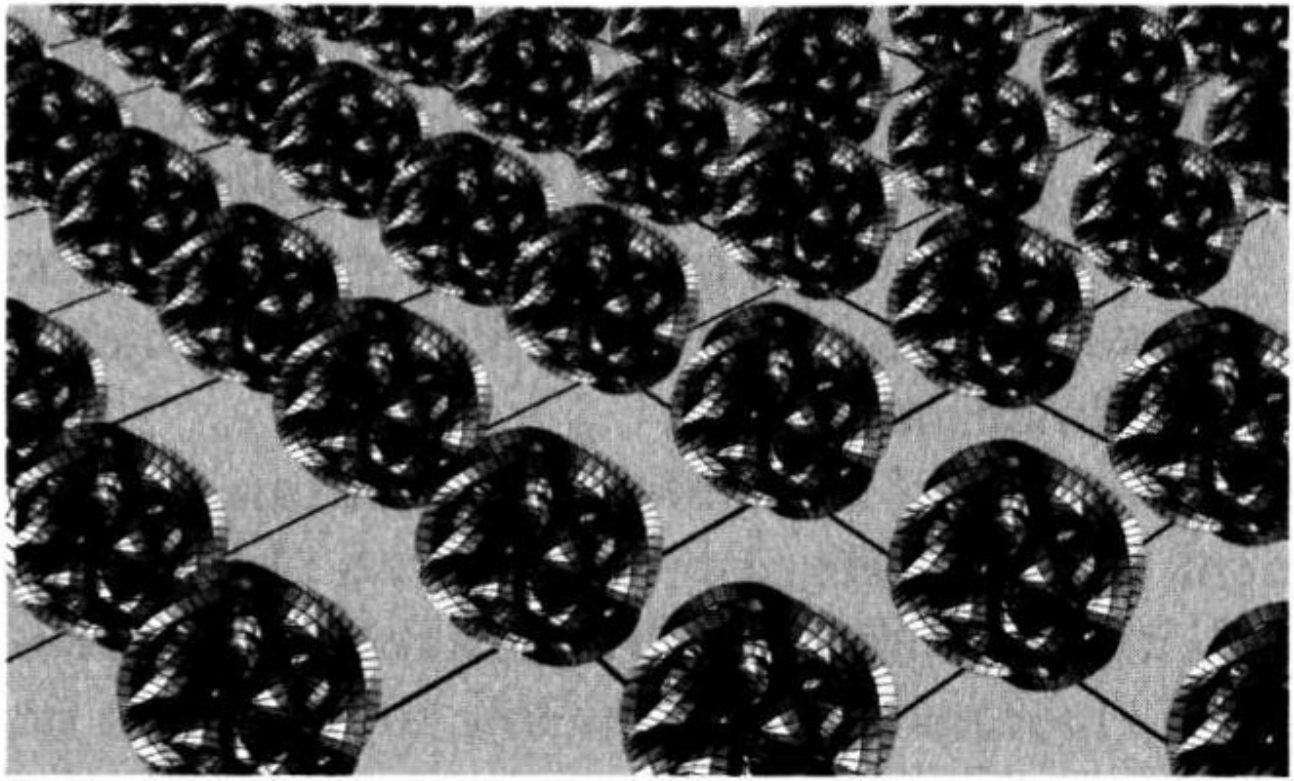
Yauu s Harvarda, čije istraživanje u srodnom kontekstu, ali prije teorije struna, igra glavnu ulogu u istraživanju tih prostora. Iako Calabi-Yauove prostore opisuje zamršena i istančana matematika, slika nam može dati osnovnu ideju o tome kako izgledaju.[8]

Na slici 8.9 prikazujemo primjer Calabi-Yauovog prostora.[9] Dok promatrate taj crtež, morate imati na umu da ilustracija pati od nepremostivih ograničenja. Pokušavamo predstaviti šestodimenzionalni prostor na dvodimenzionalnom listu papira, čime uvodimo znatna iskrivljenja. No

---

8 Matematici sklonom čitatelju napominjemo da je Calabi-Yau mnogostrukost kompleksna Kählerova mnogostrukost s iščezavajućom prvom Chernovom klasom. 1957. Calabi je pretpostavio da svaka takva mnogostrukost prihvaća Riccijevu ravnu metriku, a 1977. Yau je dokazao da je to istina.

9 Ilustraciju preuzimamo ljubaznošću Andrewa Hansona sa Sveučilišta Indiana, a načinjena je upotrebom grafičkog paketa *Mathematica* 3-D.



Slika 8.10 Prema teoriji struna, univerzum ima dodatne dimenzije, uvijene u Calabi-Yauov prostor.

ipak, ta slika prenosi grubu ideju o tome kako izgleda Calabi-Yauov prostor.[10] Oblik na slici 8.9 jedan je od mnogo desetaka tisuća Calabi-Yauovih prostora koji zadovoljavaju najstrože kriterije za dodatne dimenzije koje izviru iz teorije struna. Iako se možda čini da klub od nekoliko desetaka

tisuća članova i nije baš ekskluzivan, usporedite ga s beskonačnim brojem oblika koji su matematički mogući; tako gledano, Calabi-Yauovi prostori doista su rijetki.

U sažetku, sada biste trebali zamisliti kako sfere sa slike 8.7 – koja predstavlja dvije uvijene dimenzije – zamjenjujete nekim Calabi-Yauovim prostorom. Naime, teorija struna tvrdi da na svakoj točki triju poznatih nam protežnih dimenzija postoji šest dosad neočekivanih dimenzija, čvrsto zavijenih u neki od tih oblika prilično zamršena izgleda, kao što je ilustrirano na slici 8.10. Te dimenzije integralan su i neizbježan dio tkiva prostora; one postoje posvuda. Na primjer, kad rukom opišete širok luk, ne gibate se samo kroz tri protežne dimenzije nego i kroz te zakovrčane dimenzije. Naravno, budući da su zakovrčane dimenzije tako malene,

---

[10] Matematici sklonom čitatelju napominjemo da je taj konkretan Calabi-Yauov prostor trodimenzionalni presjek kroz kvintičnu hiperplohu u kompleksnom projektivnom četverodimenzionalnom prostoru.

pokretom ruke oplovljujete ih ogroman broj puta, uvijek se vraćajući na polazište. Njihovo sićušno prostiranje znači da nema mnogo prostora za gibanje objekta velikog poput vaše ruke – sve se uprosječuje, pa ste nakon pokreta rukom posve nesvjesni putovanja koje ste poduzeli kroz uvijene Calabi-Yauove dimenzije.

To je zapanjujuće obilježje teorije struna. No ako ste praktični, usmjerit ćete raspravu na bitna i konkretna pitanja. Sada imamo bolji dojam o tome kako izgledaju dodatne dimenzije i možemo postaviti pitanje koja fizikalna svojstva izviru iz struna koja vibriraju u tim prostorima i kako ta svojstva podnose usporedbu s promatranjima u eksperimentima? To je nagradno pitanje teorije struna.

DEVETO POGLAVLJE

Corpus delicti: eksperimentalni potpisi

Teoretičari struna bili bi najsretniji kad bi mogli svijetu ponosno predstaviti popis detaljnih, provjerljivih predviđanja. Naravno, ne može se odrediti opisuje li neka teorija naš svijet a da se njena predviđanja ne podvrgnu provjeri u eksperimentima. Koliko god bila uvjerljiva slika koju teorija struna ocrtava, ako ona ne opisuje naš univerzum točno, neće

biti nimalo relevantnija od kakve videoigre.

Edward Witten voli izjavljivati da je teorija struna već dala dramatično i eksperimentima potvrđeno predviđanje: "Teorija struna posjeduje jedno dojmljivo svojstvo: *predvidjela je gravitaciju*."[1] Witten time želi reći da su i Newton i Einstein razvili teorije gravitacije zato što su im njihova promatranja svijeta jasno pokazivala da gravitacija postoji te da stoga zahtijeva precizno i dosljedno objašnjenje. Suprotno tome, fizičar koji proučava teoriju struna – čak i ako ne zna baš ništa o općoj teoriji relativnosti – neizbježno bi došao do nje u okviru struna. Svojim modelom titranja sa spinom-2, bez mase, koji odgovara gravitonu, teorija struna ušila je gravitaciju u svoju teorijsku potku. Kao što je rekao Witten: "činjenica da je gravitacija posljedica teorije struna

---

[1] Edward Witten, "Reflections on the Fate of Spacetime", *Physics Today*, travanj 1996, str. 24.

jedna je od najvećih teorijskih spoznaja svih vremena".[2] Priznajući da je to "predviđanje", preciznije rečeno, ipak "poslijeviđanje", jer su fizičari otkrili teorijske opise gravitacije prije nego što su znali za teoriju struna, Witten ističe da je to samo povijesna slučajnost; tako se dogodilo na Zemlji. Witten vedro argumentira da je u drugim naprednim civilizacija u svemiru moguće da je prvo otkrivena teorija struna, a teorija gravitacije otkrivena je kao iznenađujuća posljedica.

Budući da smo ograničeni na povijest znanosti na svome planetu, mnogi smatraju da je to naknadno predviđanje gravitacije neuvjerljiva eksperimentalna potvrda teorije struna. Fizičari bi većinom bili daleko zadovoljniji jednom od dvije sljedeće situacije: *bona fide* predviđanjem teorije struna koje bi eksperimentatori potvrdili, ili naknadnim predviđanjem nekog obilježja svijeta (na primjer, mase elektrona ili postojanja triju porodica čestica) za koje trenutačno nema objašnjenja. U ovom poglavlju raspravit ćemo koliko su teoretičari struna napredovali prema ostvarenju tih ciljeva.

Ironija je u tome što ćemo vidjeti da, iako teorija struna ima potencijal da bude teorija s najvećom moći predviđanja od svih koje su fizičari ikad proučavali – teorija koja može objasniti fundamentalna obilježja prirode – fizičari još nisu uspjeli dati predviđanja s preciznošću dovoljnom da se suoči s podacima dobivenim eksperimentima. Poput djeteta koje za Božić dobije svoj dar iz snova, ali on ne funkcionira jer nedostaje nekoliko stranica iz uputa za upotrebu, današnji fizičari posjeduju ono što bi moglo biti sveti gral moderne znanosti, ali ne mogu osloboditi njegovu punu moć predviđanja sve dok ne uspiju napisati *cijeli* korisnički priručnik. No ipak, kao što ćemo vidjeti u ovom poglavlju, uz malo sreće bi jedna, glavna komponenta teorije struna u sljedećem desetljeću mogla dobiti potvrdu u eksperimentima. A uz mnogo više sreće, neizravni otisci teorije mogli bi se potvrditi u svakom trenutku.

---

[2] Intervju s Edwardom Wittenom, 11. svibnja 1998.

Je li teorija struna istinita? Ne znamo. Ako vjerujete da zakoni fizike ne bi smjeli biti razlomljeni na one koji vladaju velikim razmjerima i one koji vladaju malenim, te ako usto vjerujete da ne bismo smjeli mirovati dok ne budemo imali teoriju čiji je raspon primjenjivosti neograničen, teorija struna vam je jedini izbor. No, možda ćete ustvrditi da to otkriva samo nemaštovitost fizičara, a ne neku fundamentalnu jedinstvenost teorije struna. Možda i jest tako. Nadalje, mogli biste prigovoriti da su se fizičari, poput čovjeka koji traži izgubljene ključeve samo pod uličnom svjetiljkom, okupili oko teorije struna samo zato što je slučajan ishod povijesti znanosti bacio nasumičnu zraku svjetlosti upravo u tom smjeru. Možda je i to točno. A ako ste relativno konzervativni ili volite biti đavolji odvjetnik, možda ćete reći da fizičari ne trebaju gubiti vrijeme na teoriju koja postulira novo obilježje prirode koje je oko stotinu milijuna milijardi puta manje od svega što

možemo izravno sondirati u eksperimentima.

Da ste te prigovore izrazili 1980-ih, kada je teorija struna prvi put stupila na pozornicu, pridružili bi vam se neki od najuglednijih fizičara našega doba. Na primjer, sredinom 1980-ih je nobelovac s Harvarda, fizičar Sheldon Glashow, zajedno s fizičarom Paulom Ginspargom, tada također na Harvardu, javno prekorio teoriju struna zbog toga što nije dostupna eksperimentima:

> Umjesto tradicionalnog suočavanja teorije i eksperimenta, teoretičari superstruna tragaju za unutarnjim skladom, u kojemu elegancija, jedinstvenosti i ljepota definiraju istinu. Postojanje te teorije ovisi o čarobnim koincidencijama, čudesnim poništavanjima i odnosima između naizgled nepovezanih (a možda i neotkrivenih) područja matematike. Jesu li ta obilježja razlog da prihvatimo superstrune kao stvarnost? Zar matematika i estetika nadopunjuje i nadilazi puki eksperiment?[3]

---

[3] Sheldon Glashow i Paul Ginsparg, "Desperately Seeking Super-

Drugdje, Glashow je napisao:

> Teorija superstruna tako je ambiciozna da može biti ili u cjelini istinita ili u cjelini pogrešna. Jedina je nevolja u tome što je njezina matematika tako nova i teška da to nećemo doznati još mnogo desetljeća.[4]

Čak je doveo u pitanje treba li teoretičare struna sveučilište uopće "plaćati da izopačuju nevine studente" i upozoravao da teorija struna potkopava znanost kao što je srednjovjekovna teologija činila u Srednjem vijeku.[5]

Richard Feynman se nedugo prije smrti izjasnio da ne vjeruje u jedinstvenost teorije struna kao rješenja za probleme – posebno za one opake beskonačnosti – rješenja koje bi ostvarilo skladan spoj gravitacije i kvantne mehanike:

> Moj je dojam – a možda nemam pravo – da se mačka može oderati na više načina. Ne mislim da postoji samo jedan način da se riješimo beskonačnosti. Činjenica da se neka teorija otarasila beskonačnosti za mene nije dovoljan razlog da povjerujem u njenu jedinstvenost.[6]

A Howard Georgi, ugledni kolega s Harvarda i Glashowljev suradnik, također je krajem 1980-ih nesmiljeno šibao strune, da se tako izrazimo:

> Dopustimo li sebi da nas zavede sirenski zov "konačnog" ujedinjenja na tako malenim razdaljinama da nam naši prijatelji eksperimentatori ne mogu pomoći, onda smo u nevolji, jer ćemo se odreći onog presudnog procesa, prosijavanja irelevantnih ideja, kojim se fizika razlikuje od drugih, manje zanimljivih ljudskih djelatnosti.[7]

---

strings? ", *Physics Today*, svibanj 1986, str. 7.

4 Sheldon Glashow, u: *Superworld I*, ur. A. Zichichi (New York: Plenum, 1990), str. 250.

5 Sheldon Glashow, *Interactions* (New York: Warner Books, 1988), str. 335.

6 Richard Feynman, u: *Superstrings: A Theory of Everything?* ur. Paul Davies i Julian Brown (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1988).

7 Howard Georgi, u: *The New Physics*, ur. Paul Davies (Cambridge:

Kao i kad je riječ o mnogim veoma važnim pitanjima, za svakog poricatelja naći ćemo i zanesenog pristalicu. Witten je rekao da mu je, kad je doznao kako teorija struna uključuje gravitaciju i kvantnu mehaniku, to bilo "najveće intelektualno uzbuđenje" u životu.[8] Cumrun Vafa, vodeći teoretičar struna s Harvarda, rekao je da "teorija struna definitivno otkriva najdublje spoznaje o univerzumu koje smo ikad imali".[9] A nobelovac Murray Gell-Mann rekao je da je teorija struna "fantastična stvar" i da očekuje kako će neka verzija teorije struna jednoga dana biti teorija cijeloga svijeta.[10]

Kao što vidite, ta debata napaja se djelomice fizikom, a djelomice specifičnim filozofskim stajalištima o tome kako se treba baviti fizikom. "Tradicionalisti" žele da teorijski rad bude blisko povezan s opažanjima u eksperimentima, i to uglavnom prema uspješnom istraživačkom kalupu iz proteklih nekoliko stoljeća. No drugi misle da smo spremni pozabaviti se pitanjima koja nadilaze našu današnju tehnološku sposobnost za izravnu provjeru.

Bez obzira na različite filozofije, kritika teorije struna posustala je u proteklom desetljeću. Glashow to pripisuje dvama razlozima. Prvo, napominje da, sredinom 1980-ih

> Teoretičari struna su zaneseno i radosno objavljivali da će uskoro odgovoriti na sva pitanja u fizici. Budući da su danas oprezniji u svom zanosu, velik dio moje kritike iz 1980-ih više nije tako relevantan.[11]

Drugo, on također ističe:

> Mi koji nismo teoretičari struna u proteklom desetljeću nismo uopće napredovali. Dakle, stoji argument da je teorija

---

Cambridge University Press, 1989), str. 446.

8 Intervju s Edwardom Wittenom, 4. ožujka 1998.

9 Intervju s Cumrunom Vafom, 12. siječnja 1998.

10 Murray Gell-Mann, citiran u: Robert P. Crease i Charles C. Mann, *The Second Creation* (New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press), 1996, str. 414.

11 Intervju sa Sheldonom Glashowom, 28. prosinca 1997.

struna jedina predstava u gradu, i vrlo je jak. Okvir konvencionalne kvantne teorije polja nikada neće odgovoriti na neka pitanja. To je jasno. Na njih bi mogla odgovoriti neka druga teorija, a jedina druga za koju znam je teorija struna.[12]

Georgi na sličan način razmišlja o 1980-ima:

U nekim trenucima svoje rane povijesti teorija struna sve nas je prezasitila. U međuvremenu, shvatio sam da su neke zamisli u teoriji struna dovele do zanimljivih načina razmišljanja o fizici koji su i meni pomogli u radu. Danas sam mnogo zadovoljniji kad vidim da ljudi ulažu vrijeme u teoriju struna jer sada vidim da iz nje može proizaći nešto korisno.[13]

Teoretičar David Gross, predvodnik i na polju konvencionalne fizike kao i na području fizike struna, rječito je sažeo situaciju na sljedeći način:

Nekoć su u osvajanju vrhova prirode prednjačili eksperimentatori. Mi, lijeni teoretičari, kaskali smo za njima. Tu i

tamo bismo nogom udarili kakav eksperimentalni kamen koji bi nas pogodio u glavu. Na kraju bismo shvatili o čemu se radi i krenuli bismo putem koji su utrli eksperimentatori. Kad bismo dostigli svoje prijatelje, objasnili bismo im kako je lijep vidik i kako su dospjeli do njega. To je bio

---

12 Intervju sa Sheldonom Glashowom, 28. prosinca 1997

13 Intervju s Howardom Georgijem, 28 prosinca 1997. U tom intervjuu Georgi je napomenuo i da je opovrgnuće u eksperimentima predviđanja raspada protona koje je izvedeno iz prve velike ujedinjene teorije koju je predložio Glashow (vidi poglavlje 7) znatno utjecalo na njegovo oklijevanje da prihvati teoriju struna. Jetko je naglasio da njegova velika ujedinjena teorija priziva mnogo višu energiju od svih prije razmatranih teorija, a kad se njezino predviđanje pokazalo pogrešnim – kad mu je priroda "opalila šamar" – njegovo stajalište prema proučavanju fizike ekstremno visokih energija naglo se promijenilo. Kad sam ga upitao bi li ga potvrda njegove velike ujedinjene teorije eksperimentima bila mogla nadahnuti da krene u napad na Planckovu skalu, odgovorio je: "Da, vjerojatno bi bila mogla."

> star i lagan način da se teoretičari popnu na planinu. Svi čeznemo za tim danima. Ali sada mi teoretičari trebamo preuzeti vodstvo. A to je u mnogo većoj mjeri usamljenički pothvat.[14]

Teoretičari struna nemaju nikakvu želju sami se uspinjati u razrijeđenom planinskom zraku; radije bi to breme, kao i uzbuđenje koje prati uspon, podijelili s kolegama eksperimentalnim fizičarima. Samo tehnološka neusklađenost u naše doba – povijesna asinkronija – razlog je tome što su teorijska užad i kramponi za konačan uspon na vrh barem djelomično izrađeni, a eksperimentalna alpinistička oprema još ne postoji. No to ne znači da je teorija struna u bitnome odvojena od eksperimentiranja. Teoretičari struna itekako se nadaju da će "odgurnuti teorijski kamen" s planinskog vrha ultravisoke energije i hitnuti ga kolegama eksperimentatorima koji rade u baznom logoru. To je glavni cilj današnjeg istraživanja teorije struna. Zasad još nijedan kamen nije otkrhnut s vrha kako bi se dokoturao u dolinu ali, kao

što ćemo sada vidjeti, nekoliko zanimljivih i obećavajućih kamenčića zasigurno jesu.

Put prema eksperimentu

Bez monumentalnih tehnoloških otkrića nikad se nećemo moći usredotočiti na sićušne razmjere, što je nužno da bismo strunu vidjeli izravno. Akceleratorima veličine nekoliko kilometara fizičari mogu sondirati do milijardinke milijardinke metra. Sondiranje na manjim duljinama zahtijeva više energije, a to znači i veće strojeve, sposobne usmjeriti tu energiju na jednu jedinu česticu. Budući da je Planckova duljina oko 17 redova veličine manja od duljine koju mo-

---

14 David Gross, "Superstrings and Unification", u: *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics*, ur. R. Kotthaus i J. Kuhn (Berlin: Springer-Verlag, 1988), str. 329.

žemo izravno istražiti, današnjom tehnologijom trebao bi nam ciklotron veličine galaksije da bismo vidjeli pojedinačnu strunu. Štoviše, Shmuel Nussinov s Telavivskog sveučilišta argumentira da je ta gruba procjena, utemeljena na načelu upravne proporcionalnosti, vjerojatno odviše optimistična; njegova pomna studija naznačuje da bi nam trebao ciklotron veličine cijeloga svemira. (Energija potrebna za sondiranje materije na Planckovoj duljini otprilike iznosi tisuću kilovatsati – jednaka energiji potrebnoj da pokreće prosječnu klimatizaciju sto sati – pa i nije osobito velika. No, naizgled nepremostiv tehnološki problem jest kako usmjeriti svu tu energiju na jednu česticu, to jest na jednu strunu.) Nakon što je američki Kongres konačno ukinuo financiranje Supervodljivog supersudarača – ciklotrona s promjerom od "samo" 87 kilometara – nemojte se nadati novcu za Planckov ciklotron. Želimo li eksperimentima testirati teoriju struna, to ćemo morati učiniti neizravno. Morat ćemo odrediti fizikalne implikacije teorije struna koje

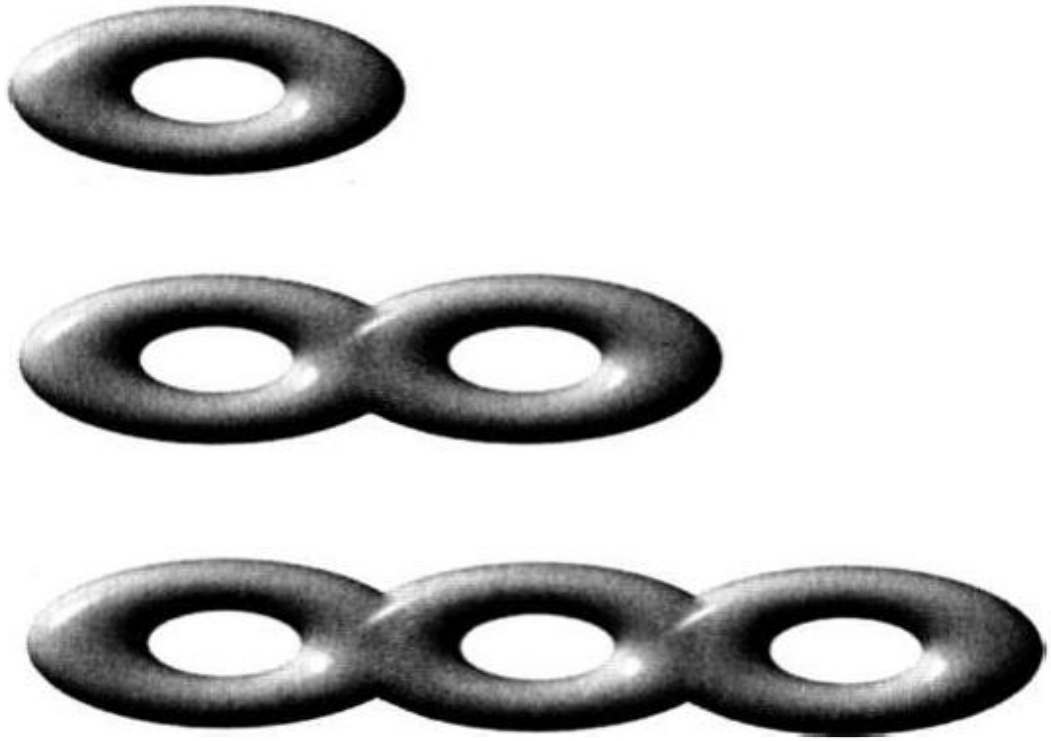
se mogu promatrati u razmjerima koji su mnogo veći od veličine same strune.[15]

Candelas, Horowitz, Strominger i Witten u svom su revolucionarnom članku poduzeli prve korake prema tom cilju. Nisu otkrili samo da dodatne dimenzije u teoriji struna moraju biti uvijene u Calabi-Yauov oblik nego su i razradili neke implikacije toga na moguće modele titranja struna. Jedan od glavnih njihovih rezultata ističe dojmljiva i neočekivana rješenja koja teorija struna nudi za tvrdokorne probleme u fizici čestica.

Prisjetimo se da se elementarne čestice koje su fizičari pronašli dijele na tri porodice, podjednako organizirane, pri čemu čestice postaju sve masivnije kako prelazimo iz jed-

---

15 S obzirom na to, valja imati na umu spekulativnu mogućnost, istaknutu u bilješci 8 za poglavlje 6, da bi strune mogle biti znatno dulje nego što se prvotno mislilo i stoga bi ih se za nekoliko desetljeća moglo izravno promatrati u eksperimentima u akceleratorima.



Slika 9.1 Uštipak, ili torus, i njegovi višestruki rođaci.

ne u drugu porodicu. Zagonetno pitanje na koje nije bilo nikakva odgovora prije teorije struna glasi: zašto *porodice* i zašto *tri*? Evo prijedloga odgovora iz teorije struna. Tipičan Calabi-Yauov prostor sadrži rupe koje su analogne onima u središtu gramofonske ploče, ili torusa, ili multitorusa, kao što je prikazano na slici 9.1. U višedimenzionalnom Calabi-

Yau kontekstu zapravo može nastati više vrsta rupa – koje pak mogu imati raznolike dimenzije ("multidimenzionalne rupe") – ali slika 9.1 izražava osnovnu ideju. Candelas, Horowitz, Strominger i Witten pomno su proučavali učinak koji te rupe imaju na moguće modele titranja struna, i evo što su pronašli.

Po jedna porodica vibracija struna najniže energije povezana je sa svakom *rupom* u Calabi-Yauovom području prostora. Budući da bi poznate nam elementarne čestice trebale odgovarati oscilacijskim modelima najniže energije, postojanje višestrukih rupa – nešto nalik na multitorus – znači da će se modeli titranja struna rasporediti u više porodica. Ako uvijeni Calabi-Yau ima tri rupe, onda ćemo pronaći tri porodice elementarnih čestica.[16] I tako, teorija struna pro-

---

[16] Matematici sklonom čitatelju napominjemo da precizniji matematički iskaz glasi da je broj porodica polovica apsolutne vrijednosti Eulerovog broja Calabi-Yauovog prostora. Eulerov broj je alterni-

glašava da organizacija porodica koja se opaža u eksperimentima nije nikakvo neobjašnjivo obilježje koje je nastalo slučajem ili božanskom voljom, nego je odraz broja rupa u geometrijskom obliku koji sadrži dodatne dimenzije! Kad čuje za takav rezultat, fizičaru zastane dah.

Možda ćete pomisliti da je broj rupa u uvijenim dimenzijama Planckove veličine – što je doista pravi fizikalni alpinizam – predstavljao onaj kamen eksperimentalne provjerljivosti koji se otkoturao u područje dostupnih nam energija. Napokon, eksperimentatori mogu odrediti – zapravo, već su odredili – broj porodica čestica: 3. Nažalost, širok je raspon brojeva rupa koje sadrže deseci tisuća poznatih Calabi-Yauovih prostora. Neki imaju tri rupe. No, drugi ih imaju 4, 5, 25 i tako dalje – a neki imaju čak 480 rupa. *Problem je u tome što zasad nitko ne zna kako iz jednadžbi teorije struna izvesti koji Calabi-Yauovi oblici tvore dodatne prostorne dimenzije.* Kad bismo uspjeli pronaći načelo koje omogućuje odabir jednog Calabi-Yauovog oblika među mnogobrojnim

mogućnostima, onda bi se kamen s planinskog vrha doista dokoturao u logor eksperimentatora. Kad bi neki konkretan Calabi-Yauov prostor koji su izdvojile jednadžbe teorije imao tri rupe, imali bismo impresivno "poslijeviđanje" teorije struna koje objašnjava jedno poznato obilježje svijeta koje je inače zagonetno. No, problem pronalaženja načela za odabir Calabi-Yauova oblika i dalje ostaje neriješen. No ipak – a to je važno – vidimo da teorija struna ima potencijal da odgovori na tu, temeljnu zagonetku fizike čestica, a to je već samo po sebi znatan napredak.

Broj porodica čestica samo je jedna eksperimentalna posljedica geometrijske forme dodatnih dimenzija. Svojim učinkom na moguće modele titranja struna, druge poslje-

---

rajući zbroj dimenzija homolognih grupa mnogostrukosto – one su jednake onome što kolokvijalno nazivamo višedimenzionalnim rupama. Dakle, tri porodice nastaju u Calabi-Yauovim prostorima čiji Eulerov broj je ±6.

dice dodatnih dimenzija su i detaljna svojstva glasničkih i materijalnih čestica. Glavni je primjer daljnji rad Stromingera i Wittena, koji je dokazao da masa svih čestica u svim porodicama ovisi o – pazite, ovo je pomalo zapetljano – načinu na koji se granice raznih višedimenzionalnih rupa u Calabi-Yauovom prostoru presijecaju i preklapaju. To je teško vizualizirati, ali riječ je o tome da u titranju struna kroz dodatne, uvijene dimenzije, precizan raspored raznih rupa i način na koji se Calabi-Yauov prostor ovija oko njih izravno utječe na moguće rezonantne modele titranja. Iako je teško pratiti te pojedinosti i one zapravo nisu bitne, važno je da nam teorija struna pruža, kao i u slučaju porodica, okvir za odgovaranje na pitanja – na primjer, zašto elektron i druge čestice imaju masu kakvu imaju – o čemu prethodne teorije ne mogu ništa reći. No, da ponovimo, za izvođenje tih proračuna potrebno je znati koji Calabi-Yauov prostor uzeti za dodatne dimenzije.

Dosadašnja rasprava daje nam dojam o tome kako bi

teorija struna jednoga dana mogla objasniti svojstva materijalnih čestica iz tablice 1.1. Teoretičari struna vjeruju da će slična priča jednoga dana objasniti i svojstva glasničkih čestica fundamentalnih sila iz tablice 1.2. Naime, kako se strune uvijaju i titraju vijugajući kroz protežne i uvijene dimenzije, malen podskup njihova golemog oscilacijskog repertoara sastoji se od vibracija sa spinom 1 ili 2. Ta vibracijska stanja su kandidati za prijenos sile. Bez obzira na oblik Calabi-Yauova prostora, uvijek postoji jedan vibracijski obrazac koji nema masu i ima spin-2; taj obrazac identificiramo kao graviton. Precizan popis glasničkih čestica sa spinom-1 – njihov broj, snaga sile koju prenose, baždarne simetrije koje poštuju – presudno ovisi o preciznom geometrijskom obliku uvijenih dimenzija. I tako, još jedanput shvaćamo da teorija struna pruža okvir za objašnjavanje opaženog sadržaja glasničkih čestica u našem univerzumu, to jest za objašnjenje svojstava fundamentalnih sila, ali

ako ne znamo točno u koji Calabi-Yauov prostor su uvijene dodatne dimenzije, ne možemo davati nikakva definitivna predviđanja ni "poslijeviđanja" (osim Wittenove primjedbe o "poslijeviđanju" gravitacije).

Zašto ne možemo dokučiti koji je "pravi" Calabi-Yauov oblik? Teoretičari struna za to okrivljuju neadekvatnost teorijskih alata koje se danas primjenjuje za analiziranje teorije struna. Kao što ćemo detaljnije raspraviti u poglavlju 12, matematički okvir teorije struna tako je zamršen da su fizičari u stanju obavljati samo približne proračune, služeći se formalizmom poznatim pod nazivom *račun smetnje*. U toj aproksimacijskoj shemi čini se da je svaki mogući Calabi-Yauov oblik ravnopravan svima drugima; jednadžbe ne izdvajaju nijedan od njih, a budući da fizikalne posljedice teorije struna u bitnome ovise o preciznom obliku uvijenih dimenzija, ako ne možemo odabrati jedan Calabi-Yauov oblik među mnogima, ne možemo donositi definitivne provjerljive zaključke. Pokretačka sila današnjih istraživanja je želja

za razvojem teorijskih metoda koje nadilaze aproksimacijski pristup, u nadi da ćemo, uz ostale koristi, doći i do jedinstvenog Calabi-Yauovog oblika za dodatne dimenzije. O napredovanju tih istraživanja raspravljat ćemo u poglavlju 13.

Neiscrpne mogućnosti

Možda se pitate sljedeće: iako još ne možemo dokučiti koji Calabi-Yauov oblik je odabrala teorija struna, zar nijedan odabir ne daje fizikalna svojstva koja su u skladu s onim što opažamo? Drugim riječima, kad bismo razradili odgovarajuća fizikalna svojstva koja su povezana sa svakim Calabi-Yauovim oblikom pojedinačno, i prikupili ih u divovskom katalogu, zar ne bismo pronašli nijedan koji bi se poklapao sa stvarnošću? To je važno pitanje, ali na njega je teško odgovoriti u potpunosti, iz dva glavna razloga.

Slika 9.2 Oblik višestrukog torusa može se deformirati na mnogo načina. Jedan od njih ilustriran je ovdje, bez promjene broja rupa koje sadrži.

Na početku bi bilo razumno usredotočiti se samo na one Calabi-Yauove oblike koji daju tri porodice. To u znatnoj mjeri sužava njihov popis, premda ih preostaje mnogo. Zapravo, treba napomenuti da višestruki torus možemo deformirati tako da jedan oblik poprimi mnogo varijanti – i to beskonačno mnogo varijanti – a da se broj rupa u njemu ne promijeni. Na slici 9.2 ilustriramo jednu takvu deformaciju oblika sa slike 9.1. Na gotovo isti način možemo početi s Ca-

Calabi-Yauovim prostorom s tri rupe i postupno deformirati njegov oblik ne mijenjajući broj rupa, te tako dobiti naizgled beskonačan niz oblika. (Kad smo spomenuli da postoje deseci tisuća Calabi-Yauovih oblika, već smo bili grupirali sve oblike koji mogu prijeći jedan u drugi putem tih postupnih deformacija, i brojili smo cijelu grupu kao jedan Calabi-Yauov prostor.) Problem je u tome što konkretna fizikalna svojstva titranja struna, njihova masa i reakcija na silu, u velikoj mjeri ovise o tako finim promjenama oblika, ali moramo ponoviti da ne znamo kako dati prednosti jednoj mogućnosti, a ne nekoj drugoj. Bez obzira na to koliko se studenata fizike bacilo na posao po nalogu svojih profesora, jednostavno nije moguće razlučiti koja fizika odgovara beskonačnom nizu različitih oblika.

Ta spoznaja navela je teoretičare struna da istraže fiziku koja se izvodi iz jednog uzorka mogućih Calabi-Yauovih oblika. No čak ni u tom slučaju nije sve išlo glatko. Aproksimativne jednadžbe kojima se teoretičari struna trenutačno

služe nisu dovoljno moćne da se na temelju njih u cjelini razradi fizika koja bi odgovarala nekom odabranom Calabi-Yauovom obliku. One nam u velikoj mjeri pomažu pri razumijevanju, ili barem približnom određivanju svojstava vibracija struna za koje se nadamo da će se poklopiti s česticama koje opažamo. No, precizni i konačni fizikalni zaključci, na primjer, o masi elektrona ili iznosu slabe sile, zahtijevaju jednadžbe koje su mnogo egzaktnije od današnjeg, aproksimativnog okvira. Prisjetimo se iz poglavlja 6 – i primjera s vlasnikom zgrade – da je "prirodna" energijska skala teorije struna Planckova energija, i da teorija struna samo krajnje delikatnim poništavanjima daje titrajne modele s masom otprilike jednakom masi poznatih materijalnih i glasničkih čestica. Delikatna poništavanja zahtijevaju precizne proračune jer čak i malene greške mogu znatno utjecati na rezultat. Kao što ćemo raspraviti u poglavlju 12, sredinom 1990-ih fizičari su načinili važan napredak u smjeru nadilaženja sadašnjih, aproksimativnih jednadžbi, no pred

njima je još dug put.

Dakle, na čemu smo? Pa, bez obzira na visoku prepreku koja se sastoji u tome što nemaju fundamentalne kriterije kojima bi odabrali jedan Calabi-Yauov prostor a ne neki drugi, a nemaju ni teorijske alatke kojima bi izlučili opazive posljedice takva odabira, i dalje možemo pitati da li *ikoji* odabir iz Calabi-Yauovog kataloga daje svijet koji se barem u osnovnim crtama slaže s opažanjima. Odgovor na to pitanje u znatnoj mjeri ohrabruje. Iako većina stavki u Calabi-Yauovom katalogu daje opazive posljedice koje se znatno razlikuju od našega svijeta (drukčiji broj porodica čestica, drukčiji broj i vrste fundamentalnih sila, uz ostala važna odstupanja), nekoliko stavki iz kataloga daju fiziku koja jest kvalitativno bliska onome što doista opažamo. Naime, *postoje* primjeri Calabi-Yauovih prostora koji, kada ih se odabere u skladu sa uvijenim dimenzijama što ih zahtijeva teorija struna, stvaraju vibracije struna koje su u bliskom

srodstvu s česticama standardnog modela. I, što je od najveće važnosti, teorija struna uspješno ugrađuje gravitacijsku silu u taj kvantnomehanički okvir.

Na našoj sadašnjoj razini razumijevanja, ova situacija je najbolja od svih kojima smo se mogli nadati. Kad bi mnogi Calabi-Yauovi prostori bili otprilike u skladu s eksperimentima, veza između konkretnog odabira i fizike koju opažamo bila bi manje uvjerljiva. Tada bi se uklapalo mnogo odabira i ne bismo mogli izdvojiti nijedan, čak ni iz perspektive eksperimenata. S druge strane, kad se nijedan Calabi-Yauov prostor ne bi čak ni približio tome da daje opažena fizikalna svojstva, činilo bi se da teorija struna, premda je to prelijep teorijski okvir, nije relevantna u našem univerzumu. Pronalazak malog broja Calabi-Yauovih oblika koji su, uz našu današnju, prilično grubu sposobnost da odredimo detaljne fizikalne implikacije, u dobroj mjeri unutar margine prihvatljivosti – ishod je koji nas osokoljuje.

Objašnjenje elementarnih svojstava materijalnih i gla-

sničkih čestica bilo bi jedno od najvećih znanstvenih postignuća, ako ne i najveće. No ipak, mogli biste pitati postoje li ikakva *pred*viđanja teorije struna – a ne "poslijeviđanja" – koja bi eksperimentalni fizičari mogli pokušati potvrditi, bilo sada ili u predvidljivoj budućnosti. Postoje.

Superčestice

Teorijske prepreke koje nas trenutačno sprečavaju da izvedemo detaljna predviđanja prema teoriji struna prisiljavaju nas da potražimo generičke, a ne specifične aspekte svemira koji se sastoji od struna. Pridjev "generički" u ovom kontekstu odnosi se na obilježja koja su fundamentalna za teoriju struna te na njih gotovo da ne utječu ona detaljna svojstva teorije koja su zasad izvan našeg teorijskog dosega, ako nisu i posve neovisna o njima. O takvim obilježjima možemo raspravljati s pouzdanjem, čak i s nepotpunim razumijeva-

njem cjelovite teorije. U sljedećim poglavljima vratit ćemo se drugim primjerima, ali zasad ćemo se usredotočiti na jedan: supersimetriju.

Kao što smo već izložili, fundamentalno svojstvo teorije struna jest da je u velikoj mjeri simetrična, što znači da ne uključuje samo intuitivna načela simetrije nego poštuje i maksimalno matematičko proširenje tih načela: supersimetriju. To znači, kao što smo raspravili u poglavlju 7, da obrasci titranja struna dolaze u parovima – superpartnerskim parovima – koji se jedan od drugoga razlikuju za pola jedinice spina. Ako je teorija struna točna, onda će neke vibracije struna odgovarati poznatim elementarnim česticama. A zbog supersimetričnog sparivanja, teorija struna daje *predviđanje* da će svaka takva poznata čestica imati superpartnera. Možemo odrediti naboje sila koje bi svaka od tih superpartnerskih čestica trebala imati, ali zasad ne znamo predvidjeti njihovu masu. No ipak, predviđanje da superpartneri *postoje* generičko je obilježje teorije struna: to svoj-

stvo teorije struna istinito je, neovisno o onim aspektima teorije koje još nismo dokučili.

Još nije opažena superpartnerska čestica nijedne poznate elementarne čestice. To bi moglo značiti da one ne postoje i da je teorija struna pogrešna. No, mnogi fizičari čestica smatraju da to znači da su superpartnerske čestice vrlo teške i stoga nadilaze naše trenutačne sposobnosti opažanja u eksperimentima. Fizičari sada grade mamutski ciklotron u Švicarskoj, u Ženevi, nazvan Veliki hadronski sudarač. Taj akcelerator čestica trebao bi biti u funkciji prije 2010. i ubrzo potom bi supersimetrija mogla biti potvrđena eksperimentom. Kao što je rekao Schwarz: "Supersimetrija bi trebala biti ubrzo otkrivena. A kad se to dogodi, bit će dramatično."[17]

No trebali bismo imati na umu dvije stvari. Čak i ako se superpartnerske čestice pronađu, sama ta činjenica neće značiti da je teorija struna točna. Kao što smo vidjeli, prem-

---

17 Intervju s Johnom Schwarzom, 23. prosinca 1997.

da je supersimetrija otkrivena proučavanjem teorije struna, ona je uspješno ugrađena i u teorije točkastih čestica i stoga nije vezana za svoje strunsko porijeklo. I obratno, čak i ako superpartnerske čestice ne budu pronađene u Velikom hadronskom sudaraču, sama ta činjenica neće isključiti teoriju struna, jer bi moglo biti da su superpartneri tako teški da su izvan dosega čak i tog stroja.

No nakon što smo se ogradili, stoji činjenica da, ako superpartnerske čestice budu pronađene, to će zasigurno biti jaka i uzbudljiva indicija u korist teorije struna.

Čestice s razlomljenim nabojem

Sljedeći eksperimentalni potpis teorije struna, koji se odnosi na električni naboj, nešto je manje generički od superpartnerskih čestica. Elementarne čestice standardnog modela imaju vrlo ograničen raspon električnih naboja. Kvarkovi

i antikvarkovi imaju električne naboje od jedne trećine ili dvije trećine, i njihove negative, dok druge čestice imaju električni naboj nula, jedan ili minus jedan. Kombinacije tih čestica obuhvaćaju svu poznatu materiju u univerzumu. No, u teoriji struna moguće je da postoje rezonantni titrajni obrasci znatno drukčijih električnih naboja. Na primjer, električni naboj čestice može poprimiti egzotične, razlomljene vrijednosti, poput 1/5, 1/11, 1/13 ili 1/53, među mnogim drugim mogućnostima. Ti neobični naboji mogu nastati ako uvijene dimenzije imaju određeno geometrijsko svojstvo: rupe s neobičnim svojstvom da se strune koje ih okružuju mogu rasplesti samo tako da se omotaju oko njih određen broj puta.[18] Detalji nisu osobito važni, ali pokazuje

---

[18] Matematici sklonom čitatelju napomenjemo da se referiramo na Calabi-Yauove mnogostrukosti s konačnom, netrivijalnom fundamentalnom grupom, čiji red u određenim slučajevima određuje nazivnike razlomačnog naboja.

se da se broj omatanja potrebnih za raspletanje manifestira dozvoljenim obrascima titranja, i to tako da se odredi zajednički nazivnik razlomljenih naboja.

Neki Calabi-Yauovi oblici imaju to geometrijsko svojstvo, dok ga drugi nemaju, i iz tog razloga mogućnost neobičnih razlomaka električnog naboja nije tako generička kao postojanje superpartnerskih čestica. S druge strane, dok predviđanje superpartnerskih čestica nije jedinstveno svojstvo teorije struna, desetljeća iskustva uvjeravaju nas da nema uvjerljiva razloga da ti egzotični, razlomljeni naboji postoje u *ijednoj* teoriji točkastih čestica. Može ih se silom ugurati u neku teoriju točkastih čestica, ali to bi bilo prirodno poput poslovičnog slona u staklarnici. Zbog toga što mogu nastati iz jednostavnih geometrijskih svojstava koja dodatne dimenzije mogu imati, ti neobični električni naboji prirodan su eksperimentalni potpis teorije struna.

Kao i u situaciji sa superpartnerima, nijedna egzotično nabijena čestica još nije opažena, a naše razumijevanje te-

orije struna ne omogućuje nikakvo određeno predviđanje njihove mase ako dodatne dimenzije imaju svojstva prikladna za njihov nastanak. To što ih nismo vidjeli ponovno se objašnjava time što, ako postoje, njihova masa zacijelo nadilazi naša današnja tehnološka sredstva – zapravo, vjerojatno je da im je masa približno jednaka Planckovoj masi. No kad bi kakav budući eksperiment naišao na čestice s tako egzotičnim nabojima, to bi bio vrlo jak dokaz teorije struna.

Neke spekulacije

Postoje i drugi načini na koje bi se moglo pronaći dokaze teorije struna. Na primjer, Witten je istaknuo spekulativnu mogućnost da bi astronomi mogli jednoga dana vidjeti izravan potpis teorije struna u podacima koje prikupljaju promatrajući nebo. Kao što smo spomenuli u poglavlju 6,

veličina strune obično je Planckova duljina, ali strune s više energije mogu u znatnoj mjeri narasti. Zapravo, energija Velikog praska bila bi dovoljno velika da stvori nekoliko makroskopski velikih struna koje bi širenjem svemira mogle narasti do astronomskih razmjera. Možemo zamisliti da bi danas, ili jednom u budućnosti, takva struna mogla zalebdjeti noćnim nebom i tako ostaviti nedvosmislen i mjerljiv utjecaj na podatke koje astronomi prikupljaju (kao što je malen pomak u temperaturi kozmičkog pozadinskog mikrovalnog zračenja; vidi poglavlje 14). Kako kaže Witten: "Premda se u nekoj mjeri temelji na mašti, to mi je omiljeni scenarij za potvrdu teorije struna, jer ništa ne bi tako dramatično riješilo to pitanje kao pogled na strunu kroz teleskop."[19]

Malo bliže Zemlji razmatraju se i drugi mogući eksperimentalni potpisi teorije struna. Ponudit ćemo pet primjera. Prvo, u tablici 1.1 primijetili smo da ne znamo jesu li neutrini samo vrlo lagani ili su doista potpuno bez mase. Prema

standardnom modelu, oni nemaju masu, ali bez ikakva dubljeg razloga. Izazov za teoriju struna je da ponudi uvjerljivo objašnjenje za sadašnje i buduće podatke, posebice ako eksperimenti na kraju pokažu da neutrini ipak imaju sićušnu masu, ali veću od nule. Drugo, postoje određeni hipotetični procesi koje standardni model zabranjuje, ali teorija struna može ih dopustiti. Među njima su potencijalni raspad protona (ne zabrinjavajte se: taj raspad, ako postoji, odvijao bi se vrlo polagano) i moguće transmutacije i raspadi raznih kombinacija kvarkova, što je u suprotnosti s nekim uvriježenim svojstvima kvantne teorije polja točkastih čestica.[20] Takvi procesi posebno su zanimljivi zbog toga što ih nema u konvencionalnoj teoriji pa su stoga dobri fizikalni signali,

---

19 Intervju s Edwardom Wittenom, 4. ožujka 1998.

20 Stručnjaku napominjemo da neki od tih procesa narušavaju očuvanje leptonskog broja, kao i reverzibilnu simetriju naboj-paritet-vrijeme (*charge-parity-time*, CPT).

koje se ne može objasniti ako se ne prihvate nova teorijska načela. Treće, za određene odabire Calabi-Yauovih prostora postoje određeni obrasci titranja struna koji mogu stvarati nova, sićušna, ali dalekometna polja sila. Ako bi se otkrili učinci takvih novih sila, možda bi odražavali neki dio nove fizike teorije struna. Četvrto, o čemu ćemo podrobnije u sljedećem poglavlju, astronomi prikupljaju podatke o tome da se naša galaksija, a možda i cijeli svemir, kupaju u tamnoj tvari, čiji identitet tek treba odrediti. Time što nudi mnoge moguće obrasce rezonantnog titranja, teorija struna predlaže nekoliko kandidata za tamnu tvar; presuda o tim kandidatima mora čekati buduće rezultate eksperimenata koji će ustanoviti detaljna svojstva tamne tvari.

I na kraju, peto moguće sredstvo za povezivanje teorije struna s opažanjima uključuje kozmološku konstantu – prisjetimo se rasprave u poglavlju 3: to je modifikacija koju je Einstein privremeno nametnuo svojim prvotnim jednadžbama kako bi osigurao statični univerzum. Iako je naknad-

no otkriće da se svemir širi navelo Einsteina da povuče tu modifikaciju, fizičari su u međuvremenu shvatili da nema objašnjenja *zašto* bi kozmološka konstanta trebala biti jednaka nuli. Zapravo, kozmološku konstantnu može se protumačiti kao svojevrsnu ukupnu energiju smještenu u vakuumu svemira, te bi se stoga njezina vrijednost morala moći teorijski izračunati i empirijski izmjeriti. No, takvi proračuni i mjerenja sve do danas nimalo se ne poklapaju: opažanja pokazuju da je kozmološka konstanta ili nula (kao što je Einstein na kraju predlagao) ili vrlo malena, a proračuni naznačuju da kvantnomehaničke fluktuacije u vakuumu praznoga prostora *generiraju* ne-nultu kozmološku konstantu čija je vrijednost oko 120 redova veličine (1 i 120 nula) veća nego što eksperiment dopušta! To je čudesan izazov i mogućnost za teoretičare struna: mogu li se proračuni teorije struna poboljšati na temelju tog nepoklapanja i objasniti zašto je kozmološka konstanta nula, a ako eksperimenti na

kraju odrede da joj je vrijednost niska, ali nije nula, može li teorija struna ponuditi objašnjenje? Ako teoretičari struna uspiju odgovoriti na taj izazov – što još nisu – to bi bio uvjerljiv dokaz u korist teorije struna.

Ocjena

Povijest fizike puna je ideja koje su se činile potpuno neprovjerljivima kad su prvi put izložene, ali su, zbog raznih nepredviđenih otkrića, na kraju dospjele u područje empirijske provjerljivosti. Poimanje da je materija načinjena od atoma, Paulijeva hipoteza da postoje tajanstvene neutrinske čestice i mogućnost da je svemir pun neutronskih zvijezda i crnih rupa – to su tri važne ideje upravo te vrste – ideje koje danas u potpunosti prihvaćamo, ali u vrijeme kada su nastale doimale su se poput spekulacija u znanstvenoj fantastici, a ne poput aspekata znanstvenih činjenica.

Motiv za uvođenje teorije struna uvjerljiv je barem poput motivacije tih triju ideja – zapravo, teorija struna pozdravljena je kao najvažniji i najuzbudljiviji razvoj na polju teorijske fizike od otkrića kvantne mehanike. Ta usporedba posebno je prikladna jer nas povijest kvantne mehanike uči da revolucijama u fizici može biti potrebno više desetljeća da dosegnu zrelost. A u usporedbi s današnjim teoretičarima struna, fizičari koji su radili na kvantnoj mehanici imali su veliku prednost: kvantna mehanika, čak i kad je bila tek djelomično formulirana, bila je u izravnom doticaju s rezultatima eksperimenata. No ipak je bilo potrebno gotovo 30 godina da se razradi logička struktura kvantne mehanike, i još oko 20 godina da se u nju u potpunosti ugradi specijalna teorija relativnosti. Sada ugrađujemo opću teoriju relativnosti, što je mnogo teži zadatak, a doticaj s eksperimentima u njegovom slučaju mnogo je teži problem. Za razliku od onih koji su razradili kvantnu mehaniku, današnji teoreti-

čari struna nemaju na raspolaganju sjajno svjetlo prirode da ih – putem detaljnih rezultata eksperimenata – vodi iz koraka u korak.

To znači da možemo očekivati da će jedna ili više generacija fizičara posvetiti život istraživanju i razvijanju teorije struna, a neće dobiti nikakav empirijski odgovor. Mnogi fizičari diljem svijeta koji marljivo razvijaju teoriju struna svjesno riskiraju: mogli bi raditi cijeli život i ostvariti neodređen rezultat. Teorijski napredak nedvojbeno neće posustati, no hoće li biti dovoljan da svlada sadašnje prepreke i ponudi definitivna predviđanja koja će se moći provjeriti eksperimentima? Hoće li neizravni testovi koje smo gore raspravili dati istinski *corpus delicti* za teoriju struna? Ta pitanja veoma su važna za sve teoretičare struna, ali o njima se ništa doista ne može reći. Odgovore može dati samo vrijeme. Prelijepa jednostavnost teorije struna, način na koji ona razrješava sukob između gravitacije i kvantne mehanike, njezina sposobnost da ujedini sve sastojke prirode i njezin

potencijal za neograničenu moć predviđanja – iz svega toga izvire nadahnuće zbog kojega je vrijedno riskirati.

Ta su uzvišena razmatranja neprekidno napajana sposobnošću teorije struna da otkriva nova, dojmljiva fizikalna obilježja univerzuma koji se temelji na strunama – obilježja koja upućuju na istančanu i duboku koherenciju u mehanizmima prirode. U jeziku koji smo predstavili, mnoga od tih svojstava su generička obilježja koja će, bez obzira na to što pojedinosti zasad nisu poznate, biti osnovna svojstva univerzuma načinjenog od struna. Najveličanstvenija od njih snažno su utjecala na naše razumijevanje prostora i vremena, koje je u stalnoj mijeni.

4. DIO

TEORIJA STRUNA I TKIVO PROSTORVREMENA

DESETO POGLAVLJE

Kvantna geometrija

Za samo desetak godina Einstein je sam samcat zbacio stoljećima star Newtonov okvir i svijetu dao radikalno novo i dokazano dublje razumijevanje gravitacije. Ni stručnjacima ni nestručnjacima nije potrebno mnogo poticaja da se prepuste divljenju nad neporecivom briljantnošću i monumentalnom originalnošću Einsteinovog postignuća u oblikovanju opće

teorije relativnosti. No ipak, ne bismo trebali izgubiti iz vida i povoljne povijesne okolnosti koje su znatno pridonijele Einsteinovom uspjehu. Najvažnija od njih su matematičke spoznaje Georga Bernharda Riemanna iz devetnaestog stoljeća, koje su čvrsto utemeljile geometrijski aparat za opisivanje zakrivljenih prostora proizvoljnih dimenzija. U svom slavnom nastupnom predavanju na sveučilištu u Göttingenu 1854. Riemann je pokidao okove euklidske misli u ravnini i utro put za demokratsko matematičko razmatranje geometrije na svakojakim zakrivljenim površinama. Riemannove spoznaje ponudile su matematiku za kvantitativnu analizu uvijenih prostora kao što su oni na slikama 3.4 i 3.6. Einsteinov genij bio je u tome što je shvatio da je ta grana matematike kao stvorena za razradu njegova novog viđenja gravitacijske sile. Hrabro je objavio da se matematika Riemannove geometrije savršeno poklapa s fizikom gravitacije.

Ali danas, gotovo stotinu godina nakon Einsteinovog remek-djela, teorija struna pruža nam kvantnomehanički

opis gravitacije koji nužno modificira opću teoriju relativnosti kada udaljenosti o kojim je riječ postanu kratke poput Planckove duljine. Budući da je Riemannova geometrija matematička jezgra opće teorije relativnosti, to znači da i nju treba modificirati kako bi vjerno odrazila novu, kratkodometnu fiziku teorije struna. Dok opća teorija relativnosti tvrdi da zakrivljenost univerzuma opisuje Riemannova geometrija, teorija struna kaže da to vrijedi samo kad tkivo svemira istražujemo na dovoljno velikim razmjerima. Na razmjerima malenima poput Planckove duljine mora nastati nova geometrija, koja se poklapa s novom fizikom teorije struna. Taj novi geometrijski okvir naziva se kvantnom geometrijom.

Za razliku od slučaja s Riemannovom geometrijom, ne postoji nikakav već spreman geometrijski opus na radnom stolu kakva matematičara koji bi teoretičari struna mogli prihvatiti i uvesti u službu kvantne geometrije. Stoga fizičari i matematičari danas marljivo proučavaju teoriju struna

i malo po malo grade novu granu fizike i matematike. Iako potpunu povijest tog razvoja tek treba napisati, ta istraživanja već su otkrila mnoga nova geometrijska svojstva prostorvremena koja implicira teorija struna – svojstva koja bi zacijelo zadivila i samoga Einsteina.

Jezgra Riemannove geometrije

Kad skačete na trampolinu, težina vašeg tijela uvija ga jer isteže njegova elastična vlakna. To istezanje najveće je točno pod vašim tijelom, a manje je vidljivo na rubu trampolina. To se jasno vidi ako je na trampolinu otisnuta poznata slika Mona Lize. Kad na trampolinu nema nikakve težine, Mona Liza izgleda normalno. Kad stanete na trampolin, slika Mona Lize se izobliči, posebno na mjestu točno ispod vašeg tijela, kao što je ilustrirano na slici 10.1.

Slika 10.1 Kad stojite na trampolinu sa slikom Mona Lize, slika se najviše izobliči na mjestu gdje stojite.

Taj primjer u srži je Riemannovog matematičkog okvira za opisivanje uvijenih prostora. Oslanjajući se na ranije spoznaje matematičara kao što su bili Carl Friedrich Gauss, Nikolaj Lobačevski, Janos Bolyai i drugi, Riemann je dokazao da pomna analiza *udaljenosti* između svih lokacija na nekom

predmetu ili u njemu pruža sredstvo za kvantificiranje mjere njegove zakrivljenosti. Govoreći pojednostavljeno, što je veće (nejednoliko) istezanje – što je veće odstupanje od odnosa udaljenosti na ravnom obliku – to je veća zakrivljenost predmeta. Na primjer, trampolin je najznačajnije istegnut točno pod vašim tijelom i stoga su odnosi udaljenosti između točaka na tom području najjače izobličeni. Dakle, to područje trampolina ima najveću mjeru zakrivljenosti, što je u skladu s vašim očekivanjima, jer tu Mona Liza trpi najveće izobličenje, pa se njen poslovično zagonetan osmijeh pomalo pretvara u grimasu.

Einstein je prihvatio Riemannova matematička otkrića tako što im je dao preciznu fizikalnu interpretaciju. Kao što smo izložili u poglavlju 3, dokazao je da zakrivljenost prostorvremena utjelovljuje gravitacijsku silu. Razmotrimo pobliže tu interpretaciju. Matematički gledano, zakrivljenost prostorvremena – poput zakrivljenosti trampolina – odra-

žava iskrivljene odnose udaljenosti između njegovih *točaka*. Fizikalno gledano, gravitacijska sila koju trpi predmet izravan je odraz tog iskrivljenja. Zapravo, kako se predmet smanjuje, fizika i matematika sve se preciznije poklapaju jer se približavamo fizikalnom ostvarenju apstraktnog matematičkog pojma točke. No teorija struna ograničava s kolikom preciznošću se Riemannov geometrijski formalizam može ostvariti u fizici gravitacije, jer predmet može biti malen samo do određene granice. Kad dođemo do struna, dalje ne možemo. U teoriji struna ne postoji tradicionalni pojam točkaste čestice – što je bitan element njezine sposobnosti da nam pruži kvantnu teoriju gravitacije. To nam konkretno pokazuje da teorija struna u ultramikroskopskim razmjerima modificira Riemannov geometrijski okvir, koji se u osnovi oslanja na udaljenosti između točaka.

Ta spoznaja ima vrlo malen utjecaj na obične, makroskopske primjene opće teorije relativnosti. Na primjer, u kozmološkim studijama fizičari redovito prave modele cije-

lih galaksija kao da su one točke, jer su ekstremno malene u odnosu na cijeli svemir. Zbog toga se pokazuje da je primjena Riemannovog geometrijskog okvira na tako grub način samo vrlo precizna aproksimacija, o čemu svjedoči uspjeh opće teorije relativnosti u kozmološkom kontekstu. No, na ultramikroskopskom području, protežnost strune jamči da Riemannova geometrija naprosto neće biti pravi matematički formalizam. Kao što ćemo sada vidjeti, moramo je zamijeniti kvantnom geometrijom teorije struna, koja ima dramatično nova i neočekivana svojstva.

Kozmološko igralište

Prema modelu kozmologije velikog praska, cijeli svemir nastao je silovitom, jedinstvenom eksplozijom prije otprilike 15 milijardi godina. Danas, kao što je otkrio Hubble, vidi-

mo da se "tragovi" te eksplozije, u obliku mnogo milijardi galaksija, još udaljavaju. Svemir se širi. Ne znamo hoće li taj svemirski rast trajati zauvijek ili će doći vrijeme kada će se širenje zaustaviti i obrnuti, te će početi implozija svemira. Astronomi i astrofizičari pokušavaju eksperimentima riješiti to pitanje, jer bi se odgovor u načelu mogao izmjeriti: riječ je o prosječnoj gustoći materije u svemiru.

Ako prosječna gustoća nadilazi takozvanu kritičnu gustoću od oko stotinke milijardinke milijardinke milijardinke (10^{-29}) grama po kubnom centimetru – oko pet atoma vodika po svakom kubnom metru svemira – onda svemir prožima dovoljno velika gravitacijska sila da zaustavi širenje i promijeni mu smjer. Ako je prosječna gustoća materije manja od kritične vrijednosti, gravitacijsko privlačenje bit će preslabo da zaustavi širenje, i ono će se nastaviti zauvijek. (Na temelju vlastitog promatranja svijeta mogli biste pomisliti da prosječna gustoća mase svemira znatno nadilazi kritičnu vrijednost. No imajte na umu da je materija – slično

novcu – sklona tome da se nalazi u nakupinama. Ako se poslužite gustoćom Zemlje, ili Sunčevog sustava, pa čak i Mliječnoga puta kao indikatorom gustoće cijeloga svemira, to bi bilo kao da vam bogatstvo Billa Gatesa služi kao indikator stanja financija prosječnog Zemljana. Kao što mnogim ljudima bankovni račun smršavi ako se usporedbi s onim Billa Gatesa, što u golemoj mjeri umanjuje zemaljski prosjek, postoji mnogo gotovo praznog prostora između galaksija koji drastično snižava ukupnu prosječnu gustoću materije.)

Pomnim proučavanjem rasporeda galaksija u svemiru, astronomi mogu prilično dobro procijeniti prosječnu količinu vidljive materije u svemiru. Pokazuje se da je ona znatno manja od kritične vrijednosti. No postoje jaki dokazi, i teorijski i eksperimentalni, da je svemir prožet tamnom materijom. To je materija koja ne sudjeluje u procesima nuklearne fuzije koji pokreću zvijezde i stoga ne emitira svjetlost; zato je nevidljiva u astronomskim teleskopima. Nitko nije

dokučio identitet tamne materije, a kamoli njezinu preciznu količinu. Dakle, konačna sudbina našeg svemira u širenju još je nejasna.

Samo radi rasprave, pretpostavimo da gustoća mase prelazi kritičnu vrijednost i da će jednoga dana u dalekoj budućnosti ekspanzija prestati i svemir će se početi urušavati u samoga sebe. Sve galaksije početak će se polako međusobno približavati, a kako vrijeme bude prolazilo, brzina tog približavanja će se povećavati sve dok ne budu hitale jedna prema drugoj zasljepljujućom brzinom. Morate zamisliti kako se cijeli svemir stišće u sve manju kozmičku masu. Kao u poglavlju 3, od maksimalne veličine od mnogo milijardi svjetlosnih godina svemir će se smanjiti na milijune svjetlosnih godina, svakoga trenutka ubrzavajući dok se *sve* ne stisne do veličine jedne galaksije, pa zatim do veličine jedne zvijezde, jednog planeta, pa sve do veličine naranče, zrna graška, zrna pijeska, i još dalje, prema općoj teoriji relativnosti, do veličine molekule, atoma, te u konačnom, neizbježnom kozmič-

kom urušavanju, do *uopće nikakve veličine*. Prema prihvaćenoj teoriji, svemir je počeo praskom iz početnog stanja nulte veličine, a ako ima dovoljnu masu, svršit će stezanjem u slično stanje krajnje kozmičke zgusnutosti.

No, kada su razmjeri o kojima je riječ bliski Planckovoj duljini ili još manji, kvantna mehanika obara jednadžbe opće teorije relativnosti, čega smo danas itekako svjesni. Umjesto nje, moramo primijeniti teoriju struna. I tako, dok Einsteinova opća teorija relativnosti omogućuje da geometrijski oblik svemira postane po volji malen – na posve isti način na koji matematika Riemannove geometrije omogućuje da apstraktni oblik poprimi onoliko malenu veličinu koliko to um može zamisliti – postavlja se pitanje kako teorija struna modificira tu sliku. Kao što ćemo sada vidjeti, postoje dokazi da teorija struna ponovno postavlja nižu granicu fizikalno dostupnim razmjerima udaljenosti i, na dojmljivo nov način, objavljuje da se svemir ne može zgusnuti

na veličinu manju od Planckove duljine, ni u jednoj svojoj prostornoj dimenziji.

Budući da sad već donekle dobro poznajete teoriju struna, mogli biste se upustiti u nagađanje zašto je to tako. Mogli biste ustvrditi da bez obzira na to koliko točaka nagomilali jednu na drugu – naime, točkastih čestica – njihov ukupan obujam i dalje ostaje nula. Suprotno tome, ako su te čestice zapravo strune, urušene jedna na drugu u potpuno nasumičnim orijentacijama, one će činiti grumen čija veličina nije nulta, poput čvora gumenih vrpci Planckove veličine. Kad biste to ustvrdili, bili biste na pravom putu, ali nedostajale bi vam važne, teško dokučive značajke koje teorija struna elegantno uvodi kako bi naznačila minimalnu veličinu svemira. Te značajke na konkretan način ističu novu fiziku struna koja ulazi u igru, kao i njen konačan utjecaj na geometriju prostorvremena.

Da bismo objasnili te važne aspekte, prvo se pozovimo na primjer koji izostavlja suvišne detalje, ali ne žrtvuje novu

fiziku. Umjesto da razmatramo svih deset prostornovremenskih dimenzija teorije struna – pa čak i četiri protežne dimenzije koje su nam dobro poznate – vratimo se univerzumu vrtnog crijeva. Taj dvodimenzionalni univerzum prvotno smo predstavili u poglavlju 8, u kontekstu prije struna, kako bismo objasnili neke aspekte spoznaja Kaluze i Kleina iz 1920-ih. Neka nam on sada posluži kao "kozmološko igralište" za istraživanje svojstava teorije struna u jednostavnoj okolini; te spoznaje ubrzo ćemo upotrijebiti kako bismo bolje razumjeli sve prostorne dimenzije koje teorija struna zahtijeva. U tom cilju, zamislimo da je kružna dimenzija univerzuma vrtnog crijeva na početku "lijepa i debela", ali potom se sve više smanjuje i oblikom približava Crtozemskoj – što je pojednostavljena, djelomična verzija velikog sažimanja.

Pitanje na koje želimo odgovoriti glasi imaju li geometrijska i fizikalna obilježja tog kozmičkog urušavanja svoj-

stva po kojima se znatno razlikuje svemir utemeljen na strunama od onoga utemeljenog na točkastim česticama.

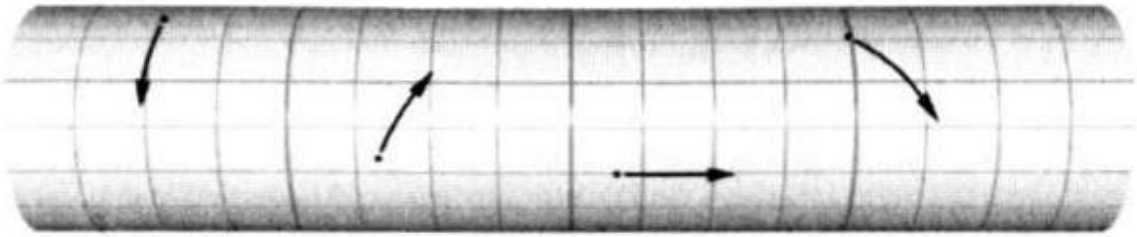
Bitno novo svojstvo

Da bismo pronašli bitno novu fiziku struna, ne moramo tražiti daleko. Točkasta čestica koja se giba u tom dvodimenzionalnom univerzumu može izvoditi gibanja ilustrirana na slici 10.2: može se gibati po protežnoj dimenziji vrtnoga crijeva, može se gibati po uvijenom dijelu vrtnoga crijeva, i izvoditi bilo koju kombinaciju toga dvoga. Struna u petlji može izvoditi slično gibanje, s jednom razlikom: dok se giba površinom, ona oscilira, kao što se vidi na slici 10.3(a). Tu razliku već smo donekle detaljno raspravili: oscilacije strune prožimaju je obilježjima kao što su masa i naboji sila. Premda je to ključan aspekt teorije struna, on nas trenutačno ne zanima jer već razumijemo njegove fizikalne implikacije.

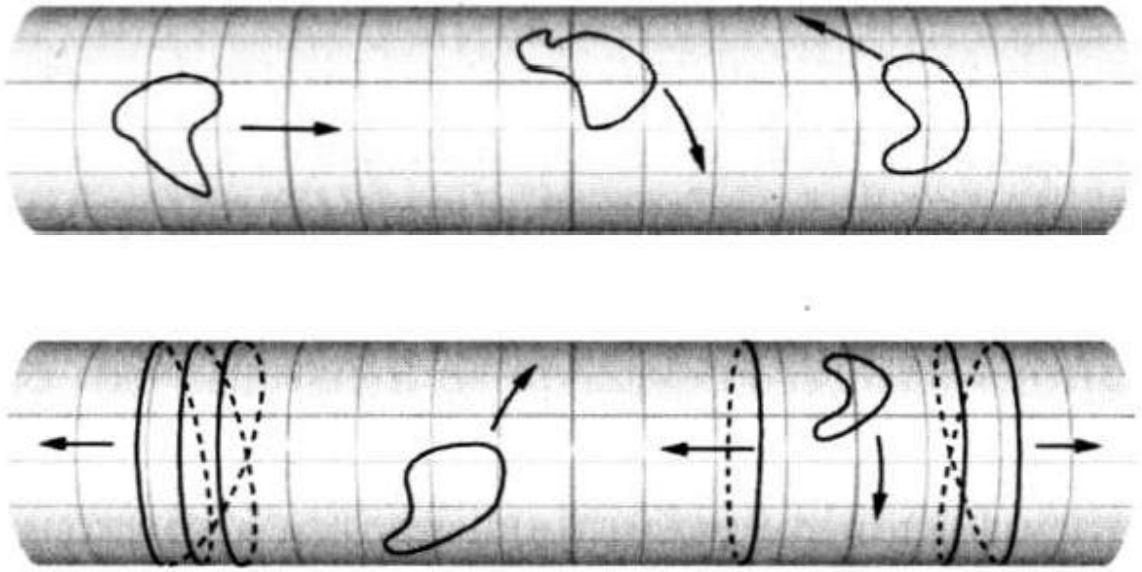
Sada nas zanima druga razlika između gibanja točkastih čestica i gibanja struna, razlika koja izravno ovisi o obliku prostora kroz koji se struna giba. Budući da je struna protežan objekt, postoji još jedna moguća konfiguracija osim već spomenutih: ona se može omotati oko kružnog dijela univerzuma vrtnog crijeva – takoreći, uhvatiti ga lasom – kao što je prikazano na slici 10.3(b).[1] Struna će i dalje kliziti i titrati, ali to će činiti u toj, proširenoj konfiguraciji. Zapravo, stru-

---

[1] Radi potpunosti napominjemo da, iako se velik dio onoga što smo dosad obradili u ovoj knjizi u jednakoj mjeri odnosi i na otvorene strune (strune sa slobodnim krajevima) i na zatvorene strune (one na koje smo se usredotočili), u ovdje razmotrenoj temi činit će se da te dvije vrste struna imaju različita svojstva. No ipak, u radu koji je 1989. odigrao presudnu ulogu u drugoj revoluciji superstruna, Joe Polchinski s Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari i dvojica njegovih studenata, Jian-Hui Dai i Robert Leigh, dokazali su da se otvorene strune savršeno uklapaju u zaključke do kojih dolazimo u ovom poglavlju.



Slika 10.2. Točkaste čestice gibaju se na valjku.



Slika 10.3 Strune se po valjku mogu gibati na dva različita načina – u "neomotanim" i "omotanim" konfiguracijama.

na se može omotati oko kružnog dijela prostora neodređen broj puta, što je također prikazano na slici 10.3(b), i ponovno

će izvoditi oscilatorno gibanje dok bude klizila amo-tamo. Kad je struna u tako omotanoj konfiguraciji, kažemo da je u navojnom modu gibanja. Dakako, biti u navojnom modu mogućnost je svojstvena strunama. Tome ne postoji pandan u svijetu točkastih čestica. Sada želimo razumjeti implikacije te kvalitativno nove vrste gibanja struna na samu strunu, kao i na geometrijska svojstva dimenzije koju omata.

Fizika navijenih struna

U našoj prethodnoj raspravi o gibanju struna usredotočili smo se na nenavijene strune. Strune koje se omataju oko kružne komponente prostora imaju gotovo sva ista svojstva kao strune koje smo proučavali. Njihovo titranje, kao i ono njihovih nenavijenih pandana, snažno pridonosi njihovim promatranim svojstvima. Bitna razlika u tome je što omotana struna ima minimalnu masu, koju određuje *veličina*

kružne dimenzije i koliko puta se omata. Oscilatorno gibanje strune određuje njen dodatni prilog u odnosu na taj minimum.

Nije teško razumjeti porijeklo te, minimalne mase. Navijena struna ima minimalnu duljinu, određenu opsegom kružne dimenzije i brojem puta kojim je struna omata. Minimalna duljina strune određuje njenu minimalnu masu: što je ta duljina veća, to je masa veća, jer je ima više. Budući da je opseg kruga proporcionalan njegovu polumjeru, minimalne mase u navojnom modu proporcionalne su polumjeru omotanoga kruga. Poslužívši se Einsteinovim odnosom mase i energije $E=mc^2$, možemo reći i da je energija navijene strune proporcionalna polumjeru kružne dimenzije. (Neomotane strune također imaju sićušnu minimalnu duljinu jer kad je ne bi imale, vratili bismo se u kraljevstvo točkastih čestica. Ista logika mogla bi nas dovesti i do zaključka da čak i neomotane strune imaju vrlo malenu, ali ipak ne nultu

čak i neomotane strune imaju vrlo malenu, ali ipak ne-nultu masu. To je u nekom smislu istinito, ali kvantnomehanički efekti na koje smo naišli u poglavlju 6 – prisjetimo se televizijske igre *Prava cijena* – lako poništavaju taj prilog masi. Tako, kao što se sjećamo, neomotane strune mogu dati, na primjer, foton, graviton i druge čestice bez mase ili gotovo bez mase. U tom smislu, omotane strune su drukčije.

Kako postojanje konfiguracija omotanih struna utječe na geometrijska svojstva dimenzije oko koje se struna omata? Odgovor, do kojega su prvi došli japanski fizičari Keiji Kikkawa i Masami Yamasaki, bizaran je i dojmljiv.

Razmotrimo posljednje, kataklizmičke stupnjeve naše varijante velikog sažimanja u univerzumu vrtnog crijeva. Dok se polumjer kružne dimenzije smanjuje na Planckovu duljinu i, u okviru opće teorije relativnosti, ne prestaje se smanjivati na još manje razmjere, teorija struna inzistira na radikalnoj interpretaciji onoga što se doista događa. Teorija struna tvrdi da su *svi* fizikalni procesi u univerzumu vrtnog crijeva u kojemu je polumjer kružne dimenzije manji od Planckove

duljine i smanjuje se apsolutno identični fizikalnim procesima u kojima je kružna dimenzija dulja od Planckove duljine i povećava se! To znači da, kako se kružna dimenzija pokušava urušiti kroz Planckovu duljinu i krenuti prema još manjim veličinama, zbog teorije struna taj pokušaj je uzaludan, jer ona mijenja geometriju. Teorija struna pokazuje da se taj proces može izraziti drukčije – ispravno protumačiti – dok se kružna dimenzija smanjuje do Planckove duljine i potom se proširuje. Teorija struna prerađuje zakone geometrije na malim udaljenostima tako da ono što se prije doimalo kao potpuno urušavanje svemira postaje svemirski *odbojnik*. Kružna dimenzija može se smanjiti do Planckove duljine. Ali zbog modova omatanja, pokušaji daljnjeg sažimanja zapravo rezultiraju širenjem. Pogledajmo zašto.

*Spektar stanja struna**

Nova mogućnost konfiguracija navijenih struna implicira da energija strune u univerzumu vrtnog crijeva dolazi iz dvaju izvora: vibracijskoga gibanja i energije navijanja. Prema naslijeđu Kaluze i Kleina, oba ovise o geometriji crijeva, to jest o polumjeru njegove uvijene komponente, ali u jasnom kontekstu struna, jer se točkaste čestice ne mogu omotavati oko dimenzija. Dakle, naš prvi zadatak bit će precizno odrediti u kojoj mjeri navijajući i titrajući prinosi energiji ovise o veličini kružne dimenzije. U tu svrhu pokazalo se prikladnim razdvojiti vibracijsko gibanje struna na dvije kategorije: *jednoliko* i *obično* titranje. Obične vibracije odnose se na uobičajene oscilacije o kojima smo već više puta raspravljali, poput onih ilustriranih na slici 6.2; jedno-

---

* Neke ideje u ovom i sljedećih nekoliko odjeljaka prilično su zakučaste pa se nemojte obeshrabriti ako ne budete lako pratili svaku kariku u eksplanatornom lancu — posebno nakon prvog čitanja.

like vibracije odnose se na još jednostavnije gibanje: ukupno gibanje strune dok ona prelazi s jednog mjesta na drugo a da ne promijeni oblik. Cjelokupno gibanje strune je kombinacija klizanja i osciliranja – jednolikih i običnih vibracija – ali za ovu raspravu prikladno je ovako ih razdvojiti. Zapravo, obične vibracije neće igrati glavnu ulogu u našem razmišljanju i stoga ćemo njihove učinke uključiti tek nakon što izložimo srž argumenta.

Na početku, dvije bitne napomene. Prvo, jednolike vibracijske pobude strune imaju energiju koja je *obrnuto* proporcionalna polumjeru kružne dimenzije. To je izravna posljedica kvantnomehaničkog načela neodređenosti: manji polumjer strože ograničava strunu i stoga, u svojevrsnoj kvantnomehaničkoj klaustrofobiji, povećava količinu energije u njezinu gibanju. Dakle, kako se polumjer kružne dimenzije smanjuje, energija gibanja strune nužno se povećava – što je prepoznatljivo obilježje obrnute proporcionalnosti. Drugo, kao što smo vidjeli u prethodnom odjeljku,

energija navojnog moda izravno je – a ne obrnuto – proporcionalna polumjeru. Prisjetimo se, to je zato što je minimalna duljina navijenih struna, a time i njihova minimalna energija, proporcionalna polumjeru. Te dvije napomene određuju da velike vrijednosti polumjera impliciraju veliku energiju navijanja i malenu energiju vibracije, dok malene vrijednosti polumjera impliciraju malenu energiju navijanja i veliku energiju vibracija.

To nas vodi do ključne činjenice: za svaki veliki kružni polumjer univerzuma vrtnog crijeva postoji odgovarajući mali kružni polumjer za koji je navijajuća energija struna u prvom univerzumu jednaka vibracijskoj energiji struna u drugom, i vibracijska energija struna u prvom jednaka je navijajućoj energiji struna u drugom. Kako su fizikalna svojstva osjetljiva na *ukupnu* energiju konfiguracije strune – a ne na to kako se energija dijeli na vibracije i navijanje – *ne postoji fizikalna razlika* između tih *geometrijski različi-*

tih oblika univerzuma vrtnog crijeva. I tako, začudo, teorija struna tvrdi da uopće nema razlike između "debelog" i "mršavog" univerzuma vrtnog crijeva.

To je kozmičko vezano klađenje, donekle slično onome što biste kao pametan investitor činili kad se sučite sa sljedećom zagonetkom. Zamislite da doznate da su sudbine dviju dionica kojima se trguje na Wall Streetu – recimo, tvrtke koja proizvodi sprave za tjelovježbu i tvrtke koja proizvodi umjetne srčane zaliske – nerazdvojno povezane. Obje su na kraju dana završile trgovanje s vrijednošću od jednog dolara po dionici, a pouzdan izvor vam kaže da će, ako jednoj tvrtki vrijednost dionice poraste, drugoj pasti, i obratno. Štoviše, vaš izvor – koji je posve vjerodostojan (ali prelazi granice legalnosti) – kaže vam da će završne cijene dionica tih dviju tvrtki sutra zasigurno biti obratno proporcionalne jedna drugoj. Naime, ako jedna dionica završi s vrijednošću od 2 dolara, druga će završiti na 1/2 dolara (50 centi); ako jedna dionica završi na 10 dolara, druga će završiti na 1/10 dolara

i tako dalje. No vaš izvor ne može vam reći koja dionica će imati visoku cijenu, a koja nisku. Što vam je činiti?

Dakle, odmah investirajte sav svoj novac u dionice, podjednako u dionice tih dviju tvrtki. Kao što lako možete provjeriti ako razradite nekoliko primjera, što god da se sutra dogodi, nikako ne možete izgubiti novac. U najgorem slučaju ostat će isti (ako obje tvrtke završe na 1 dolar), ali svaka promjena cijena dionica – u skladu s insajderskim informacijama vašeg izvora – povećat će vrijednost vašeg portfelja. Na primjer, ako tvrtka za fitness završi na 4 dolara, a tvrtka za srčane zaliske na 1/4 dolara (25 centi), njihova kombinirana vrijednost je 4,25 dolara (za svaki par dionica), u usporedbi s 2 dolara jučer. Štoviše, iz perspektive ukupne vrijednosti, uopće nije bitno hoće li tvrtka za fitness završiti s visokom cijenom a tvrtka za srčane zaliske s niskom ili obratno. Ako vas zanima samo ukupna količina novca, te dvije okolnosti financijski su nerazlučive.

Situacija u teoriji struna analogna je po tome što energija u konfiguracijama struna dolazi iz dvaju izvora – vibracija i navijanja – čiji su prilozi ukupnoj energiji strune općenito različiti. No, kao što ćemo vidjeti s više pojedinosti, određeni parovi posebnih geometrijskih okolnosti – koji vode prema visokoj energiji navijanja / niskoj energiji vibracija ili niskoj energiji navijanja / visokoj energiji vibracija – fizikalno su nerazlučivi. I, za razliku od financijske analogije, u kojoj se drugim razmatranjima može razlikovati dvije vrste dionica, ne postoji nikakva fizikalna razlika između tih dvaju scenarija sa strunama.

Zapravo, vidjet ćemo da, kako bismo pojačali analogiju s teorijom struna, trebamo razmotriti što bi se dogodilo da nismo na početku novac podijelili podjednako na dvije tvrtke nego smo kupili, recimo, 1000 dionica tvrtke za fitness i 3000 dionica tvrtke za srčane zaliske. U tom slučaju ukupna vrijednost vašeg portfelja ovisi o tome koja će tvrtka završiti s visokom, a koja s niskom cijenom dionica. Na primjer, ako

dionice završe na 10 dolara (fitness) i 10 centi (srčani zalisci), vaše početno ulaganje od 4000 dolara vrijedit će 10 300 dolara. Ako se dogodi obratno – dionice završe na 10 centi (fitness) i 10 dolara (srčani zalisci) – vaš će portfelj vrijediti 30 100 dolara – znatno više.

No ipak, obrnut odnos između konačnih cijena dionica osigurava sljedeće. Ako vaša prijateljica učini upravo suprotno vama – kupi 3000 dionica tvrtke za fitness i 1000 dionica tvrtke za srčane zaliske – onda će vrijednost njezinih dionica biti 10 300 dolara ako dionice završe s niskom vrijednošću za fitness, a visokom za zaliske (isto kao vaš portfelj ako fitness završi visoko, a zalisci nisko), a 30 100 dolara ako završe s visokom vrijednošću za fitness, a niskom za zaliske (opet, isto kao za vaš portfelj u recipročnoj situaciji). Dakle, s gledišta ukupne vrijednosti portfelja, zamjena visoke i niske završne vrijednosti dionica precizno se kompenzira zamjenom broja dionica koje posjedujete od svake tvrtke.

Imajmo to na umu dok se vraćamo teoriji struna i razmišljamo o mogućim energijama struna u specifičnom primjeru. Zamislimo da je polumjer kružne dimenzije vrtnog crijeva, recimo, deset puta veći od Planckove duljine. To ćemo napisati ovako: $R = 10$. Struna se može omotati oko te kružne dimenzije jedanput, dvaput, triput i tako dalje. Broj puta koliko se struna omota oko kružne dimenzije naziva se njezinim *navojnim brojem*. Energija od navijanja, koja je određena duljinom navijene strune, proporcionalna je *umnošku* polumjera i navojnog broja. Osim toga, za svaki iznos navijanja, struna može biti podvrgnuta vibracijskom gibanju. Budući da jednolike vibracije na koje se sada usredotočujemo imaju energiju obratno proporcionalnu polumjeru, one su proporcionalne cjelobrojnim višekratnicima *recipročne* vrijednosti polumjera – $1/R$ – što je u ovom slučaju desetinka Planckove duljine. Taj cjelobrojni višekratnik zovemo *vibracijskim brojem*.[2]

Kao što vidimo, ta situacija vrlo je slična onoj na Wall Streetu, pri čemu su navojni i vibracijski brojevi izravne

analogije dionicama dviju tvrtki, a R i $1/R$ su analogni završnim cijenama svake dionice. Dakle, kao što lako možemo izračunati ukupnu vrijednost svog ulaganja na temelju broja dionica svake tvrtke i završnih cijena, ukupnu energiju strune možemo izračunati po njezinu vibracijskom broju, navojnom broju i polumjeru. U tablici 10.1 dajemo djelomičan popis tih ukupnih energija za razne konfiguracije struna, koje navodimo po njihovom navojnom i vibracijskom broju, u univerzumu vrtnog crijeva s polumjerom $R = 10$.

---

[2] Ako se pitate zašto su moguće uniformne vibracijske energije cjelobrojni višekratnici od $1/R$, dovoljno je vratiti se na raspravu o kvantnoj mehanici – posebno u skladištu – u poglavlju 4. Ondje smo naučili da kvantna mehanika implicira da energija, poput novca, dolazi u odvojenim hrpicama: cjelobrojnim višekratnicima raznih energijskih denominacija. U slučaju jednolikog vibracijskog gibanja struna u univerzumu vrtnoga crijeva ta denominacija je upravo $1/R$, kao što smo dokazali u tekstu pozvavši se na načelo neodređenosti. Stoga su energije uniformnih vibracija cjelobrojni višekratnici od $1/R$.

Potpuna tablica bila bi beskonačno dugačka jer navojni i vibracijski brojevi mogu poprimiti proizvoljne cjelobrojne vrijednosti, ali ovaj reprezentativan dio tablice prikladan je za našu raspravu. Iz tablice i iz naših napomena vidimo da smo u situaciji visoke navojne energije i niske vibracijske energije: navojna energija izražava se višekratnicima broja 10, a vibracijska višekratnicima manjega broja, 1/10.

Sada zamislimo da se polumjer kružne dimenzije smanjuje, recimo, s 10 na 9,2, pa na 7,1 i dalje na 3,4, 2,2, 1,1, 0,7, sve do 0,1 (1/10), gdje smanjivanje prestaje, što se tiče naše rasprave. U toj, geometrijski specifičnoj formi univerzuma vrtnog crijeva možemo sastaviti analognu tablicu energija struna: navojne energije sada su višekratnici broja 1/10, dok su vibracijske energije višekratnici njemu recipročnog broja 10. Rezultate prikazujemo u tablici 10.2.

Na prvi pogled čini se da su te tablice različite. No kad pobliže pogledamo, iako su drukčije složene, stupci "ukupne energije" u objema tablicama imaju jednake vrijednosti.

Da bismo pronašli odgovarajuću vrijednost u tablici 10.2 za odabranu stavku u tablici 10.1, moramo samo zamijeniti vibracijski broj navojnim. Naime, titranje i navijanje igraju komplementarne uloge kad se polumjer kružne dimenzije promijeni s 10 na 1/10. I tako, što se tiče ukupne energije strune, nema razlike između tih različitih veličina kružne dimenzije. Kao što se zamjena visoke i niske završne vrijednosti dionica fitnessa i srčanih zalistaka precizno kompenzira zamjenom broja dionica tvrtki, tako se zamjena polumjera 10 polumjerom 1/10 precizno kompenzira zamjenom vibracijskog i navojnog broja. Štoviše, dok smo se radi jednostavnosti usredotočili na početni polumjer $R = 10$ i njegovu recipročnu vrijednost 1/10, zaključak je isti za svaki odabir polumjera i njegove recipročne vrijednosti.[3]

---

[3] Govoreći matematički, identitet između energija struna u univerzumu s kružnom dimenzijom čiji polumjer je ili R ili $1/R$ izvire iz činjenice da su te energije u obliku $v/R + wR$, gdje je v vibracijski

Vibracijski broj	Navojni broj	Ukupna energija
1	1	1/10 + 10 = 10,1
1	2	1/10 + 20 = 20,1
1	3	1/10 + 30 = 30,1
1	4	1/10 + 40 = 40,1
2	1	2/10 + 10 = 10,2
2	2	2/10 + 20 = 20,2
2	3	2/10 + 30 = 30,2
2	4	2/10 + 40 = 40,2
3	1	3/10 + 10 = 10,3
3	2	3/10 + 20 = 20,3
3	3	3/10 + 30 = 30,3
3	4	3/10 + 40 = 40,3

4	1	4/10 + 10 = 10,4
4	2	4/10 + 20 = 20,4
4	3	4/10 + 30 = 30,4
4	4	4/10 + 40 = 40,4

Tablica 10.1 Primjer vibracijskih i navojnih konfiguracija strune koja se giba u univerzumu prikazanom na slici 10.3, s polumjerom $R = 10$. Vibracijska energija pridonosi višekratnicima broja 1/10, a navojna energija pridonosi višekratnicima broja 10, što daje ukupnu navedenu energiju. Energijska jedinica je Planckova energija, tako da, na primjer, 10,1 u posljednjem stupcu znači 10,1 puta Planckova energija.

---

broj a w je navojni broj. Ta jednažba je invarijantna pri istodobnoj razmjeni v i w, kao i R i $1/R$ – tj. pri razmjeni vibracijskog i navojnog broja i inverziji polumjera. U ovoj raspravi radimo s Planckovim jedinicama, ali možemo raditi i s uobičajenijim jedinicama tako da napišemo energijsku formulu pomoću $\sqrt{\alpha'}$– takozvane skale struna – čija vrijednost je oko Planckove duljine, 10^{-33} centime-

Vibracijski broj	Navojni broj	Ukupna energija
1	1	10 + 1/10 = 10,1
1	2	10 + 2/10 = 10,2
1	3	10 + 3/10 = 10,3
1	4	10 + 4/10 = 10,4
2	1	20 + 1/10 = 20,1
2	2	20 + 2/10 = 20,2
2	3	20 + 3/10 = 20,3
2	4	20 + 4/10 = 20,4
3	1	30 + 1/10 = 30,1
3	2	30 + 2/10 = 30,2
3	3	30 + 3/10 = 30,3
3	4	30 + 4/10 = 30,4

4	1	40 + 1/10 = 40,1
4	2	40 + 2/10 = 40,2
4	3	40 + 3/10 = 40,3
4	4	40 + 4/10 = 40,4

Tablica 10.2 Kao tablica 10.1, osim što je sada polumjer 1/10.

Tablice 10.1 i 10.2 nepotpune su iz dva razloga. Prvo, kao što smo spomenuli, naveli smo samo nekoliko od beskonačnog broja mogućnosti za navojne/vibracijske brojeve koje struna može preuzeti. Naravno, to ne predstavlja nikakav problem – tablice bismo mogli načiniti onoliko dugačkima koliko nam strpljenje dopušta i pronašli bismo da se odnosi među njima ne mijenjaju. Drugo, osim energije navijanja,

---

tra. Tada možemo izraziti energije struna kao $v/R + wR/\alpha'$, što je invarijantno u razmjeni v i w kao R i α'/R, gdje su oni sada izraženi konvencionalnim jedinicama udaljenosti.

zasad smo razmotrili samo energijske priloge od jednolikog vibracijskog gibanja strune. Sada bismo trebali uključiti i obične vibracije jer one daju dodatne priloge ukupnoj energiji strune i određuju naboj sile koji ona nosi. No, važno je što su istraživanja otkrila da ti prilozi ne ovise o veličini polumjera. Dakle, čak i kad bismo u tablice 10.1 i 10.2 uključili ta, detaljnija svojstva atributa struna, tablice bi i se dalje poklapale jer prilog običnih vibracija podjednako utječe na obje tablice. Stoga zaključujemo da su mase i naboji čestica u univerzumu vrtnog crijeva polumjera R potpuno jednaki onima u univerzumu vrtnog crijeva polumjera $1/R$. A budući da te mase i ti naboji vladaju fundamentalnom fizikom, ta dva geometrijski različita univerzuma nemoguće je fizikalno razlikovati. Svaki eksperiment u takvom univerzumu ima odgovarajući eksperiment koji se može izvesti u drugom, a oba vode do posve jednakih rezultata.

George i Gracie, nakon što su se spljoštili i postali dvodimenzionalna bića, zapošljavaju se kao profesori fizike u univerzumu vrtnoga crijeva. Utemeljili su svoje suparničke laboratorije i oboje tvrde da su odredili veličinu kružne dimenzije. Začudo, premda su oboje ugledni po tome da istraživanja obavljaju s velikom preciznošću, njihovi zaključci se ne poklapaju. George tvrdi da kružni polumjer iznosi $R = 10$ puta Planckova duljina, dok Gracie tvrdi da je kružni polumjer $R = 1/10$ puta Planckova duljina.

"Gracie", kaže George, "na temelju mojih teorijskih proračuna, znam da, ako kružna dimenzija ima polumjer 10, onda mogu očekivati da ću vidjeti strune čija energija je navedena u tablici 10.1. Neumorno sam eksperimentirao s novim akceleratorom Planckove energije i otkrio sam da je to predviđanje precizno potvrđeno. Dakle, pouzdano tvrdim

da kružna dimenzija ima polumjer $R = 10$." Braneći svoje tvrdnje, Gracie izjavljuje posve isto, ali njezin zaključak glasi da je pronašla popis energija iz tablice 10.2, što potvrđuje da je polumjer $R = 1/10$.

Gracie se upali žaruljica i ona pokaže Georgeu da su te dvije tablice zapravo jednake, iako su drukčije složene. George, koji je, kao što je dobro poznato, malo sporiji od Gracie, odgovara: "Kako to može biti? Znam da različite vrijednosti polumjera, zbog osnovne kvantne mehanike i svojstava navijenih struna, daju različite moguće vrijednosti energije i naboja struna. Ako se slažemo u vezi s tim, moramo se složiti i u vezi s polumjerom."

Služeći se svojom novom spoznajom o fizici struna, Gracie odgovara: "To što kažeš gotovo je posve točno. *Obično* je istina da dvije različite vrijednosti polumjera daju drukčije dopuštene energije. Međutim, u posebnim okolnostima, kada su vrijednosti polumjera obratno proporcionalne jedna drugoj – poput 10 i 1/10 – dopuštene energije i naboji zapra-

vo su identični. Vidiš, ono što ti zoveš navojnim modom ja zovem vibracijskim modom, a ono što ti zoveš vibracijskim modom ja zovem navojnim modom. Prirodu nije briga kakvim jezikom se služimo. Fizikom vladaju svojstva *fundamentalnih sastojaka* – mase (energije) čestica i naboji sile koje nose. Bilo da je polumjer R ili $1/R$, potpun popis tih svojstava fundamentalnih čestica u teoriji struna je identičan."

Georgeu proradi kliker i on odgovara: "Mislim da razumijem. Iako se detaljan opis koji ti i ja možemo dati za strune razlikuje – jesu li ili nisu navijene oko kružne dimenzije, i po osobitostima njihova vibracijskog ponašanja – potpun popis fizikalnih karakteristika koje mogu steći je isti. Dakle, budući da fizikalna svojstva svemira ovise o tim svojstvima osnovnih sastojaka, nema razlike, nikako se ne može razlikovati polumjere koji su obratno proporcionalni jedan drugome." Upravo tako.

U ovom trenutku mogli biste reći: "Gledajte, da sam maleno biće u univerzumu vrtnog crijeva, jednostavno bih izmjerio opseg crijeva krojačkim metrom i tako nedvosmisleno odredio polumjer – bez ikakva filozofiranja. Kakve su to besmislice o dvjema nerazlučivim mogućnostima s različitim polumjerima? Nadalje, zar se teorija struna nije riješila udaljenosti manjih od Planckove duljine, pa zašto onda uopće razgovaramo o kružnim dimenzijama s polumjerima koji su tek razlomak Planckove duljine? I na kraju, kad smo već kod toga, koga je briga za dvodimenzionalni univerzum vrtnog crijeva – kako sve to izgleda kad uključimo sve dimenzije?"

Počnimo s posljednjim pitanjem, jer će nas odgovor prisiliti da se suočimo s prva dva.

Iako se naša rasprava odvija u univerzumu vrtnog crijeva, ograničili smo se na jednu protežnu i jednu uvijenu prostornu dimenziju samo radi jednostavnosti. Ako imamo

tri protežne prostorne dimenzije i šest kružnih dimenzija – što je najjednostavniji Calabi-Yauov prostor – zaključak je posve isti. Svaki krug ima polumjer koji, ako se razmijeni sa sebi recipročnim, daje fizikalno identičan univerzum.

Taj zaključak možemo prenijeti i korak dalje. U našem svemiru opažamo tri prostorne dimenzije, i sve se one, prema astronomskim mjerenjima, protežu oko 15 milijardi svjetlosnih godina (svjetlosna godina je oko 10 bilijuna kilometara, pa je ta udaljenost otprilike 145 milijardi bilijuna kilometara). Kao što smo spomenuli u poglavlju 8, ništa nam ne govori što se događa iza toga. Ne znamo nastavljaju li se protezati u beskonačnost ili se možda uvijaju u same sebe u obliku golema kruga, izvan dometa najsuvremenijih teleskopa. Ako je to slučaj, astronaut koji putuje svemirom, ne mijenjajući smjer, na kraju bi napravio krug cijelim svemirom – poput Magellana koji je prvi proputovao oko svijeta – i vratio se na polazište.

Dakle, poznate protežne dimenzije možda su također u obliku kruga te bi i za njih vrijedilo fizikalno jednačenje R s $1/R$. Konkretizirajmo to približnim brojevima: ako su poznate dimenzije kružne, onda im polumjer mora biti spomenutih 15 milijardi svjetlosnih godina, što je oko deset bilijuna bilijuna bilijuna bilijuna (R=1061) puta više od Planckove duljine, i povećava se kako se svemir širi. Ako je teorija struna točna, to je fizikalno jednako tome da su poznate dimenzije kružne, s nevjerojatno sićušnim polumjerom od oko $1/R = 1/1061 = 10–61$ puta Planckova duljina! To su naše, dobro poznate dimenzije, u alternativnom opisu koji daje teorija struna. Zapravo, u tom, recipročnom jeziku, ti sićušni krugovi još se i smanjuju s prolaskom vremena, jer kako se R povećava, $1/R$ se smanjuje. Čini se da smo sada doista zabrazdili. Kako bi to moglo biti istina? Kako bi ljudsko biće moglo "stati" u tako nevjerojatno mikroskopski univerzum? Kako bi takav grumenčić od univerzuma mogao biti fizikalno identičan nebeskim prostranstvima

kojima se divimo? Nadalje, sada nam se nameće drugo od naša početna tri pitanja: teorija struna trebala je ukloniti mogućnost sondiranja udaljenosti manjih od Planckove duljine. Ali ako kružna dimenzija ima polumjer čija duljina je veća od Planckove duljine, njegova recipročna vrijednost $1/R$ nužno je razlomak Planckove duljine. Dakle, što se to događa? Odgovor na to pitanje, koji se odnosi i na prvo od naša tri pitanja, ističe važan i teško dokučiv aspekt prostora i udaljenosti.

Dva međupovezana pojma udaljenosti u teoriji struna

Udaljenost je temeljan pojam u našem razumijevanju svijeta i lako je podcijeniti koliko je on zapravo istančan. S obzirom na iznenađujuće utjecaje koje su specijalna i opća teorija re-

lativnosti imale na naše poimanje prostora i vremena, kao i na nova svojstva koja izviru iz teorije struna, trebali bismo biti malo oprezniji i kada definiramo udaljenost. Najsmislenije definicije u fizici su one koje su operativne – naime, definicije koje pružaju sredstvo da se ono što se definira i izmjeri, barem u načelu. Napokon, koliko god pojam bio apstraktan, kad imamo operativnu definiciju, njegovo značenje možemo reducirati na eksperimentalni postupak za mjerenje njegove vrijednosti.

Kako možemo dati operativnu definiciju pojma udaljenosti? Odgovor na to pitanje u kontekstu teorije struna prilično je neočekivan. Fizičari Robert Brandenberger sa sveučilišta Brown i Cumrun Vafa sa sveučilišta Harvard istaknuli su da u kružnom obliku prostorne dimenzije postoje dvije različite, ali srodne operativne definicije udaljenosti u teoriji struna. Svaka razlaže poseban eksperimentalni postupak za mjerenje udaljenosti i temelji se, pojednostavljeno govoreći, na jednostavnom načelu da, ako sonda putuje stalnom i

poznatom brzinom, određenu udaljenost možemo izmjeriti tako da odredimo koliko dugo sondi treba da je prijeđe. Razlika između tih dvaju postupaka je u odabiru sonde. Prva definicija služi se strunama koje nisu navijene na kružnu dimenziju, dok se druga definicija služi strunama koje *jesu* navijene. Vidimo da je priroda protežnosti fundamentalne sonde odgovorna za to što postoje dvije prirodne operativne definicije udaljenosti u teoriji struna. U teoriji točkastih čestica, u kojoj ne postoji pojam navijanja. postojala bi samo jedna takva definicija.

U čemu se razlikuju rezultati tih dvaju postupaka? Odgovor Brandenbergera i Vafe neočekivan je koliko je i istančan. Osnovna ideja rezultata može se shvatiti pozivom na načelo neodređenosti. Nenavijene strune mogu se slobodno gibati i sondirati pun opseg kruga, duljinu proporcionalnu s R. Prema načelu neodređenosti, energija im je proporcionalna s $1/R$ (iz poglavlja 6 prisjetimo se obratnog odnosa

između energije sonde i udaljenosti na koju je osjetljiva). S druge strane, vidjeli smo da navijene strune imaju minimalnu energiju proporcionalnu s R; načelo neodređenosti kazuje nam da su one stoga osjetljive na recipročan iznos te vrijednosti, $1/R$. Matematičko utjelovljenje te ideje pokazuje da će nenavijena struna izmjeriti R kao polumjer kružne dimenzije, a navijena struna izmjerit će $1/R$, pri čemu, kao i prije, udaljenosti mjerimo kao višekratnike Planckove duljine. Rezultat svakog eksperimenta ima jednako pravo biti polumjer kruga – od teorije struna naučili smo da upotreba različitih sondi za mjerenje udaljenosti može dati različite odgovore. Zapravo, to svojstvo širi se na sva mjerenja duljina i udaljenosti, a ne samo na određivanje veličine kružne dimenzije. Rezultati postignuti navijenim i nenavijenim strunama kao sondama bili bi obratno proporcionalni jedni drugima.[4]

---

[4] Možda se pitate kako je moguće da struna koja se proteže cijelim

putem oko kružne dimenzije polumjera R ipak izmjeri polumjer $1/R$. Premda je to opravdano pitanje, odgovor se krije u njegovoj nepreciznoj formulaciji. Vidite, kad kažemo da je struna omotana oko kruga polumjera R, nužno se pozivamo na definiciju udaljenosti (tako da izraz "polumjer R" ima smisla). Ali *ta* definicija udaljenosti relevantna je za modove nenavijenih struna – to jest, za vibracijske modove. S gledišta te definicije udaljenosti – i samo te definicije – konfiguracija navijenih struna kao da se proteže oko kružnog dijela prostora. Međutim, prema drugoj definiciji udaljenosti, onoj koja se primjenjuje na konfiguracije navijenih struna, one su isto tako lokalizirane u prostoru kao što su to vibracijski modovi s gledišta prve definicije udaljenosti, a polumjer koji one "vide" je $1/R$, kao što se izlaže u tekstu.

Taj opis daje neki smisao tvrdnji da navijene i nenavijene strune mjere udaljenosti koje su obratno proporcionalne. No budući da je to prilično neprohodan iskaz, vjerojatno vrijedi navesti i stručnu analizu za matematički obrazovanog čitatelja. U običnoj su kvantnoj mehanici točkastih čestica udaljenost i količina gibanja (zalet; u biti, energija) povezani su Fourierovom transformacijom. Naime, svojstveno stanje položaja $|x>$ na krugu polumjera R može se definirati kao $|x>= \sum_v e^{ixp}|p>$ gdje $p = v/R$ i $|p>$ je svojstveno sta-

Ako teorija struna opisuje naš svemir, zašto na ta dva moguća pojma udaljenosti nismo naišli u svakodnevnom životu, ili barem u znanosti? Kad god razgovaramo o udaljenosti, činimo to na način koji se slaže s našim iskustvom da postoji samo jedan pojam udaljenosti i nema nikakve naznake da postoji i drugi pojam. Zašto smo propustili alternativnu mogućnost? Odgovor je sljedeći: iako u našoj raspravi postoji visok stupanj simetrije, kad god se R (a time i $1/R$) znatno razlikuje od vrijednosti 1 (puta Planckova duljina, naravno), onda se pokazuje da je jednu od naših operativnih definicija krajnje teško provesti, a drugu pak ekstremno lako. U biti, uvijek smo išli linijom manjeg otpora, posve nesvjesni da postoji i druga mogućnost.

Nerazmjer stupnjeva težine tih dvaju pristupa prouzročen je vrlo različitim masama upotrijebljenih sondi – visoka navojna energija / niska vibracijska energija i obratno – ako se polumjer R (i stoga i $1/R$) znatno razlikuje od Planckove duljine (to jest, $R = 1$). "Visoka" energija ovdje, za polumje-

re koji su bitno različiti od Planckove duljine, odgovara ne-

---

nje količine gibanja (čiju izravnu analogiju smo nazvali jednoliko vibracijskim modom strune – ukupnim gibanjem bez promjene oblika). No, u teoriji struna postoji i druga koncepcija svojstvenog stanja položaja $|\widetilde{x}>$ definirana upotrebom stanja navijenih struna: $|\widetilde{x}>=\sum_w e^{i\widetilde{x}\widetilde{p}}|\widetilde{p}>$ gdje je $|\widetilde{p}>$ navijeno svojstveni stanje s $\widetilde{p}=wR$. Iz tih definicija odmah vidimo da je x periodično s periodom $2\pi R$ dok je $\widetilde{x}$ periodično s periodom $2\pi/R$, što pokazuje da je x položajna koordinata na krugu polumjera R dok je $\widetilde{x}$ položajna koordinata na krugu polumjera 1/R. Još eksplicitnije rečeno, sad možemo zamisliti dva valna paketa $|x>$ i $|\widetilde{x}>$, koji počinju, recimo, na izvoru, i pustiti ih da se razvijaju u vremenu kako bismo ostvarili svoj operativni pristup za definiranje udaljenosti. Polumjer kruga, izmjeren i jednom i drugom sondom, tada je proporcionalan vremenskom razmaku potrebnom da se paket vrati u svoju početnu konfiguraciju. Budući da se stanje s energijom E razvija s faznim faktorom koji uključuje Et, vidimo da je vremenski razmak, a stoga i polumjer, jednak $t \sim 1/E \sim R$ za vibracijske modove, a $t \sim 1/E \sim 1/R$ za navijene modove.

vjerojatno masivnim sondama – milijardama i milijardama puta težima od protona, na primjer – dok "niska" energija odgovara sondama mase tek mrvicu veće od nule. U takvim okolnostima postoji monumentalna razlika u težini između tih dvaju pristupa jer je čak i proizvodnja konfiguracije teških struna pothvat koji je trenutno izvan domašaja naše tehnologije. Dakle, u praksi je tehnološki ostvariv samo jedan od dvaju pristupa – onaj s lakšim od dvaju tipova konfiguracija struna. To je onaj koji implicitno služi u svim našim dosadašnjim raspravama o udaljenosti. Taj oblikuje i našu intuiciju, i poklapa se s njom.

Ostavimo li po strani praktična pitanja, u svemiru kojim vlada teorija struna slobodni smo mjeriti udaljenosti bilo jednim, bilo drugim pristupom. Kad astronomi mjere "veličinu svemira", to čine istražujući fotone koji su prevalili put preko svemira i nekim slučajem ušli u njihove teleskope. U toj situaciji fotoni predstavljaju *lagani* mod struna. Postignut rezultat je 1061 puta Planckova duljina, kao što smo

već rekli. Ako su tri poznate nam prostorne dimenzije doista kružne i teorija struna je ispravna, astronomi koji bi se služili znatno drukčijom (i danas nepostojećom) opremom u načelu bi mogli izmjeriti nebesko prostranstvo teškim navijenim modovima struna i doći do rezultata recipročnog toj golemoj udaljenosti. U tom smislu možemo shvaćati svemir kao ili golem, što obično činimo, ili kao strašno malen. Prema laganim modovima struna, svemir je golem i širi se; prema teškim modovima, sićušan je i steže se. U tome nema nikakva proturječja; umjesto toga imamo dvije različite ali jednako razumne definicije udaljenosti. Prva definicija mnogo nam je bliža zbog tehnoloških ograničenja, ali ipak, i jedna i druga podjednako su valjani pojmovi.

Sada možemo odgovoriti na ranije postavljeno pitanje o velikim ljudima u malenom svemiru. Kad izmjerimo visinu čovjeka i vidimo da iznosi, recimo, 180 centimetara, nužno se služimo modom laganih struna. Da bismo usporedili

njegovu veličinu s veličinom svemira, moramo se poslužiti istim mjernim postupkom i, kao gore, on daje 15 milijardi svjetlosnih godina kao veličinu svemira, što je mnogo više od 180 centimetara. Pitati kako takva osoba može "stati" u sićušan svemir kad ga se mjeri modom teških struna – to znači miješati kruške i jabuke. Budući da sada imamo dva pojma udaljenosti – služeći se ili laganim ili teškim strunama kao sondama – moramo uspoređivati mjerenja načinjena na isti način.

Minimalna veličina

Putovanje nam nije bilo lako, ali sada smo spremni za glavnu tvrdnju. Ako se držimo mjerenja udaljenosti na "lak način" – to jest, služeći se najlakšim modovima struna umjesto onih teških – dobiveni rezultati uvijek će biti veći od Planckove duljine. Da bismo to vidjeli, promislimo proces

hipotetičnog velikog sažimanja za tri protežne dimenzije, pod pretpostavkom da su kružne. Recimo da su na početku našeg misaonog eksperimenta nenavijene strune lagane, a njihovom upotrebom određeno je da svemir ima golem polumjer i da se s vremenom smanjuje. Kako se smanjuje, ti nenavojni modovi postaju teži, a navojni modovi postaju lakši. Kad se polumjer smanji sve do Planckove duljine – to jest, kad R poprimi vrijednost 1 – navojni i vibracijski modovi dobivaju usporedivu masu. Postaje podjednako teško provesti oba pristupa i, štoviše, oba će dati isti rezultat jer je broj 1 recipročan sam sebi.

Kako se polumjer i dalje smanjuje, navojni modovi postaju lakši od nenavijenih i stoga, budući da se uvijek odlučujemo za "lakši pristup", sada bi *njih* trebalo upotrijebiti za mjerenje udaljenosti. Prema toj mjernoj metodi, koja daje *recipročnu* vrijednost one koja je izmjerena nenavojnim modovima, polumjer je veći od Planckove duljine i pove-

ćava se. To je jednostavan odraz činjenice da kako se R – veličina izmjerena nenavijenim strunama – smanjuje na 1 i dalje, $1/R$ – veličina izmjerena navijenim strunama – raste prema 1 i dalje. Dakle, ako dosljedno uvijek primjenjujemo modove laganih struna – "lagan" pristup mjerenju udaljenosti – minimalna vrijednost na koju nailazimo je Planckova duljina.

Konkretno govoreći, veliko sažimanje na nulu je izbjegnuto, jer je polumjer svemira izmjerenog strunama u laganom modu struna uvijek veći od Planckove duljine. Umjesto da prođe kroz Planckovu duljinu prema još manjoj veličini, kao što se mjeri najlakšim modovima struna, on se smanji na Planckovu duljinu i tada se odmah počne povećavati. Umjesto sažimanja dolazi do "odboja".

Upotreba laganih modova struna poklapa se s našim uobičajenim pojmom duljine – onim koji postoji odavno, mnogo prije otkrića teorije struna. U skladu s *tim* pojmom

mnogo prije otkrića teorije struna. U skladu s *tim* pojmom udaljenosti, kao što smo vidjeli u poglavlju 5, naišli smo na nepremostive probleme sa silovitim kvantnim titrajima, ako fizikalnu ulogu igraju udaljenosti manje od Planckove duljine. Iz te komplementarne perspektive ponovno vidimo da se teorijom struna izbjegavaju ultrakratke udaljenosti. U fizikalnom okviru opće teorije relativnosti i u za nju prikladnom matematičkom okviru postoji jedan pojam udaljenosti, i može poprimiti po volji malene vrijednosti. U fizikalnom okviru teorije struna i u za nju prikladnom okviru kvantne geometrije postoje dva pojma udaljenosti. Opreznom primjenom i jednog i drugog pronalazimo pojam udaljenosti koji se poklapa i s našom intuicijom i s općom teorijom relativnosti kada su udaljenosti velike, a dramatično se razlikuje od njih kad su udaljenosti postanu malene. Konkretno govoreći, udaljenosti manje od Planckove duljine su nedostupne.

Budući da je ova rasprava prilično zakučasta, ponovimo središnju tvrdnju. Kad bismo odbacili razliku između "la-

ganog" i "teškog" pristupa mjerenju duljine i, recimo, nastavili upotrebljavati nenavojne modove dok se R smanjuje preko Planckove duljine, moglo bi se činiti da bismo doista mogli naići na udaljenosti manje od Planckove duljine. No, u gornjim odlomcima doznali smo da riječ "udaljenost" u posljednjoj rečenici trebamo oprezno protumačiti jer može imati dva različita značenja, od kojih se samo jedno poklapa s našim tradicionalnim pojmom. A u ovom slučaju, kada se R smanji ispod Planckove duljine a mi se i dalje služimo nenavijenim strunama (iako su one sada postale teže od navijenih struna), primjenjujemo "težak" pristup mjerenju udaljenosti, te se stoga značenje "udaljenosti" *ne* poklapa s našom uobičajenom upotrebom. Čak i ako odlučimo služiti se nestandardnim pojmom udaljenosti i tako opišemo polumjer kao kraći od Planckove duljine, *fizika* na koju naiđemo – kao što smo raspravili u prethodnim odjeljcima – bit će jednaka onoj u univerzumu u kojemu je polumjer, u uobičajenom smislu udaljenosti, veći od Planckove duljine (o

čemu svjedoči, na primjer, potpuno poklapanje tablice 10.1 i 10.2). A važna je fizika, a ne jezik.

Brandenberger, Vafa i drugi fizičari poslužili su se tim idejama kako bi predložili da se napišu zakoni kozmologije u kojima veliki prasak i moguće veliko sažimanje ne bi uključivali svemir nulte veličine nego svemir Planckove duljine u svim dimenzijama. To je zacijelo vrlo privlačan prijedlog za izbjegavanje matematičkih, fizikalnih i logičkih slijepih ulica svemira koji izvire iz beskonačno guste točke ili se urušava u nju. Iako je konceptualno teško zamisliti cjelinu svemira sabijenu u grumenčić Planckove veličine, doista je nemoguće zamisliti ga stisnutog u nešto što uopće nema nikakvu veličinu. Kozmologija struna, kao što ćemo raspraviti u poglavlju 14, još je u pelenama, ali mnogo obećava i mogla bi nam ponuditi prihvatljiviju alternativnu standardnom modelu velikog praska.

Koliko je taj zaključak općenit?

Što ako prostorne dimenzije nisu kružnog oblika? Vrijede li i dalje ti dojmljivi zaključci o minimalnoj prostornoj protežnosti u teoriji struna? To nitko ne zna pouzdano. Bitan aspekt kružnih dimenzija u tome je što one dopuštaju mogućnost navijenih struna. Sve dok prostorne dimenzije – bez obzira na pojedinosti njihova oblika – dopuštaju da se strune navijaju oko njih, vrijedit će većina zaključaka koje smo izveli. Ali što ako su, recimo, dvije dimenzije u obliku kugle? U tom slučaju strune ne mogu ostati "zarobljene" u navijenoj konfiguraciji jer uvijek mogu "skliznuti", kao što rastegnuta guma može skliznuti s košarkaške lopte. Da li teorija struna ipak ograničava veličinu do koje se te dimenzije mogu stegnuti?

Čini se da brojna istraživanja pokazuju da odgovor ovisi o tome je li cijela prostorna dimenzija sažeta (kao u primjerima u ovom poglavlju) ili (na što ćemo naići i objasniti u

poglavljima 11 i 13) se urušava izoliran "komad" prostora. Opće vjerovanje među teoretičarima struna glasi da, bez obzira na oblik, postoji minimalna ograničavajuća veličina, kao u slučaju kružnih dimenzija, ako sažimamo cijelu prostornu dimenziju. Odrediti to očekivanje važan je cilj daljnjih istraživanja jer ono ima važan utjecaj na velik broj aspekata teorije struna, uključujući i njezine implikacije za kozmologiju.

Zrcalna simetrija

Općom teorijom relativnosti Einstein je iskovao vezu između fizike gravitacije i geometrije prostorvremena. Na prvi pogled, teorija struna jača i proširuje vezu između fizike i geometrije, jer svojstva titrajućih struna – njihova masa i naboji sila koje nose – u velikoj mjeri su određena svojstvi-

ma uvijene komponente prostora. No upravo smo vidjeli da kvantna geometrija – povezanost geometrije i fizike u teoriji struna – ima neke neočekivane značajke. U općoj teoriji relativnosti, i u "konvencionalnoj" geometriji, krug polumjera R razlikuje se od kruga polumjera $1/R$, i tu se nema što dodati; no ipak, u teoriji struna njih se fizikalno ne može razlikovati. To nas navodi na to da budemo dovoljno hrabri da pođemo korak dalje i pitamo mogu li postojati geometrijski oblici prostora koji se razlikuju na još drastičnije načine – ne samo po veličini nego možda i po obliku – ali su u teoriji struna ipak nerazlučivi.

Godine 1988. Lance Dixon iz Stanford Linear Accelerator Centra došao je do ključnog uvida u tom smislu, a dodatno su ga osnažili Wolfgang Lerche s CERN-a, Vafa na Harvardu i Nicholas Warner, tada na MIT-u. Na temelju estetskih argumenata zasnovanih na razmatranjima simetrije, ti fizičari su iznijeli hrabar prijedlog da je moguće da dva različita Calabi-Yauova prostora, odabrana prema svo-

jim dodatnim uvijenim dimenzijama u teoriji struna, daju posve istu fiziku.

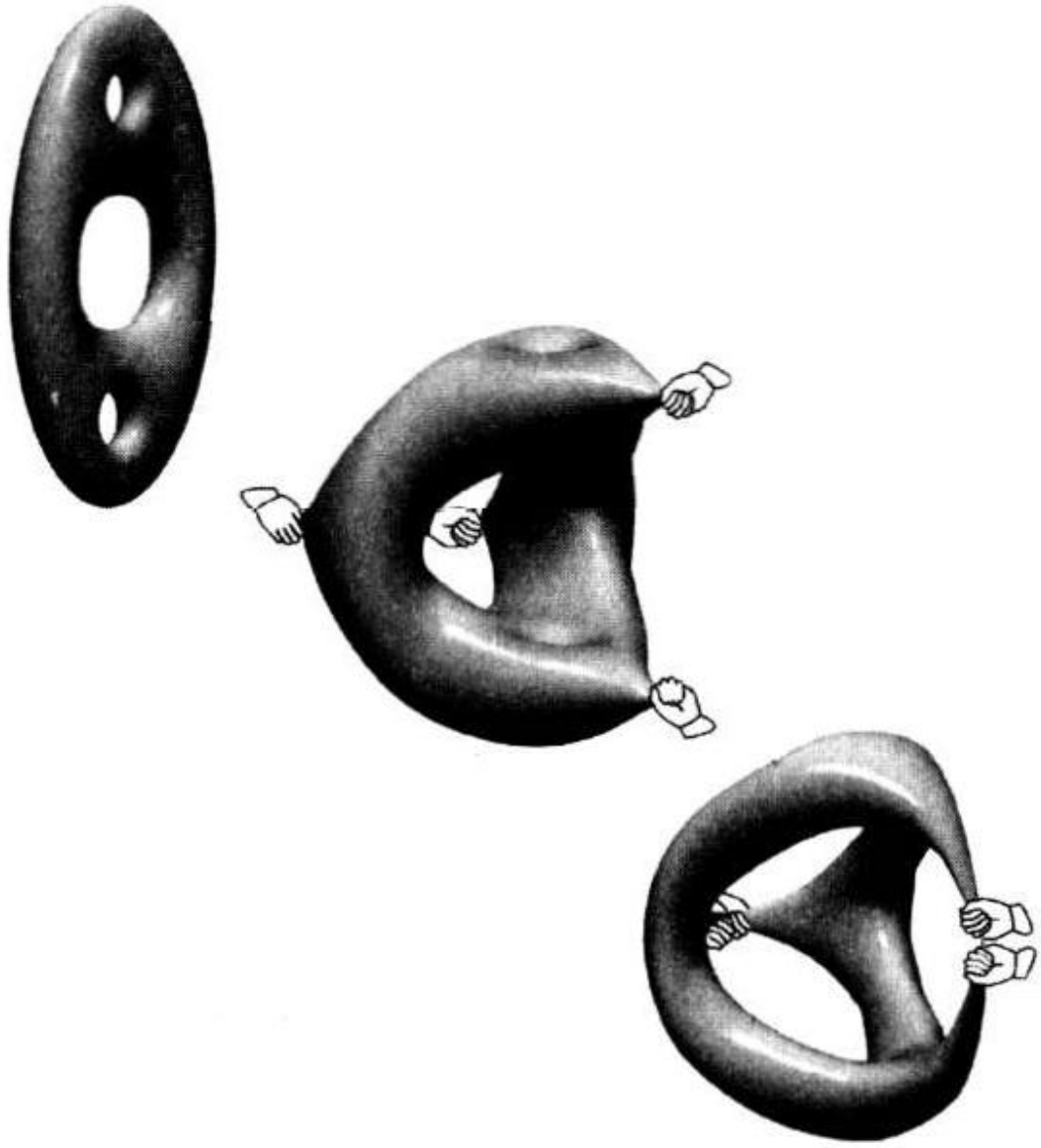
Da biste stekli predodžbu o tome kako bi se ta spekulativna mogućnost doista mogla ostvariti, prisjetite se da broj rupa u dodatnim Calabi-Yau dimenzijama određuje broj porodica u koje će se rasporediti pobude struna. Te rupe analogne su rupama koje nalazimo u torusu ili njegovim višestrukim rođacima, kao što je ilustrirano na slici 9.1. Nedostatak dvodimenzionalne slike koju moramo otisnuti na stranici u tome je što ne može prikazati da šestodimenzionalni Calabi-Yauov prostor može imati rupe u mnoštvu dimenzija. Premda je takve rupe teško naslikati, možemo ih opisati matematikom koju dobro razumijemo. Ključna činjenica je da broj porodica čestica koje nastaju vibracijama struna ovisi samo o ukupnom broju rupa, a ne o broju rupa u svakoj pojedinoj dimenziji (zato se, na primjer, u raspravi u poglavlju 9 nismo potrudili razlikovati razne vrste rupa).

Dakle, zamislimo dva Calabi-Yauova prostora u kojima se broj rupa u različitim dimenzijama razlikuje, ali u kojima je ukupan broj rupa jednak. Budući da broj rupa u svakoj pojedinoj dimenziji nije jednak, ta dva Calabi-Yauova prostora imaju različit oblik. No budući da imaju jednak ukupan broj rupa, daju svemire s *jednakim brojem porodica*. Naravno, to je samo jedno fizikalno svojstvo. Poklapanje svih fizikalnih svojstava mnogo je stroži zahtjev, ali to nam barem daje neki dojam o tome kako bi Dixon-Lerche-Vafa-Warnerova pretpostavka mogla biti istinita.

Na jesen 1987. zaposlio sam se na odsjeku za fiziku na Harvardu kao postdoktorski istraživač i moj ured bio je u istom hodniku kao i Vafin. Budući da se moje istraživanje usmjerilo na fizikalna i matematička svojstva uvijenih Calabi-Yauovih dimenzija u teoriji struna, Vafa me je redovito obavještavao o svom radu na tom području. Kad je ušao u moj ured na jesen 1988. i obavijestio me o pretpostavci do koje su došli on, Lerche i Warner, bio sam zainteresiran, ali

i skeptičan. Zanimao sam se jer sam znao da bi istinitost te pretpostavke otvorila nove putove istraživanja teorije struna; skeptičan sam bio jer sam znao da je pretpostavke jedno, a utvrđene značajke teorije nešto sasvim drugo.

Sljedećih mjeseci često sam razmišljao o njihovoj spekulaciji i, iskreno rečeno, napola sam se uvjerio da nije istinita. No, začudo, naizgled nevezan istraživački projekt na kojemu sam radio s Ronenom Plesserom, tada studentom na Harvardu, a danas profesorom na Institutu Weizmann i Sveučilištu Duke, ubrzo me je naveo da se predomislim. Plesser i ja počeli smo se zanimati za razvoj metoda za matematičku manipulaciju Calabi-Yauovim oblikom kako bi se proizvelo dosad nepoznate Calabi-Yauove oblike. Posebno nas je privlačila metoda poznata kao *orbifolding*, koju su sredinom 1980-ih razvijali Dixon, Jeffrey Harvey sa sveučilišta Chicago, Vafa i Witten. Pojednostavljeno govoreći, tim postupkom se različite točke na početnom Calabi-Yauovom obliku



Slika 10.4 *Orbifolding* je postupak kojim nastaje nov Calabi-Yau-ov oblik, lijepljenjem raznih točaka na početnom Calabi-Yauovom obliku.

obliku.

"lijepe" u skladu s matematičkim pravilima prema kojima nastaje nov Calabi-Yauov oblik. To je shematski ilustrirano na slici 10.4. Matematika u osnovi manipulacija ilustriranih na slici 10.4 je zamršena i stoga su teoretičari struna pomno istraživali taj postupak samo u primjeni na najjednostavnije oblike – višedimenzionalne verzije torusa prikazanih na slici 9.1. Plesser i ja shvatili smo da bi neke briljantne spoznaje Dorona Gepnera, tada na Princetonu, mogle ponuditi jak teorijski okvir za primjenu metode *orbifoldinga* na pune Calabi-Yauove oblilke, poput onog na slici 8.9.

Nakon nekoliko mjeseci intenzivne razrade te ideje došli smo do neočekivane spoznaje. Kad smo na određene skupine točaka zalijepili na upravo prikladan način, Calabi-Yauov prostor koji smo načinili upadljivo se razlikovao od početnoga: broj rupa u *neparnim* dimenzijama novog Calabi-Yauovog prostora bio je jednak broju rupa u *parnim* di-

menzijama početnog oblika, i obratno. Konkretno, to znači da je ukupan broj rupa – a stoga i broj porodica čestica – u oba jednak, iako razmjena parnih i neparnih dimenzija znači da im se oblici i osnovne geometrijske strukture u znatnoj mjeri razlikuju.[5]

Uzbuđeni zbog svog očitog doticaja s Dixon-Lerche-Vafa-Warnerovom spekulacijom, Plesser i ja inzistirali smo na glavnom pitanju: osim broja porodica čestica, poklapaju li se ta dva Calabi-Yauova prostora i u ostalim fizikalnim svojstvima? Nakon još nekoliko mjeseci pomne i iscrpljujuće matematičke analize, u kojoj su nas nadahnjivali i ohrabrivali Graham Ross, moj mentor na Oxfordu, i Vafa, Plesser i ja uspjeli smo argumentirati da je odgovor zasigurno pozitivan. Zbog matematičkih razloga koji se odnose na razmjenu parnih i neparnih dimenzija, Plesser i ja skovali smo izraz *zrcalne mnogostrukosti?* kako bismo opisali fizikalno ekvivalentne ali geometrijski različite Calabi-Yauove prostore.[6] Pojedinačni prostori u zrcalnom paru nisu doslovno

obostrane zrcalne slike, u našem svakodnevnom smislu. No iako imaju različita geometrijska svojstva, oni daju jedan te

---

5 Čitatelju koji voli matematiku napominjemo da, preciznje rečeno, broj porodica vibracija struna iznosi jednu polovicu apsolutne vrijednosti Eulerove karakteristike Calabi-Yauovog prostora, kao što smo spomenuli u bilješci 16 za poglavlje 9. To je dano apsolutnom vrijednošću *razlike* između $h^{2,1}$ i $h^{1,1}$, gdje $h^{p,q}$ označuje (p, q) Hodgeov broj. Na brojčani pomak oni daju broj netrivijalnih homoloških trojnih ciklusa ("trodimenzionalnih rupa") i broj homoloških dvojnih ciklusa ("dvodimenzionalnih rupa"). I tako, dok u glavnom tekstu govorimo o ukupnom broju rupa, preciznija analiza pokazuje da broj porodica ovisi o apsolutnoj vrijednosti razlike između neparno- i parnodimenzionalnih rupa. No, zaključak je isti. Na primjer, ako se dva Calabi-Yauova prostora razlikuju razmjenom svojih Hodgeovih brojeva $h^{2,1}$ i $h^{1,1}$, broj porodica čestica – i ukupan broj "rupa" – neće se promijeniti.

6 Ime potječe od činjenice da su "Hodgeovi dijamanti" – matematički sažetak rupa raznih dimenzija u Calabi-Yauovu prostoru – za svaki Calabi-Yauov prostor zrcalnog para zrcalni odrazi jedan drugoga.

isti fizikalni svemir kad ih se upotrijebi za dodatne dimenzije u teoriji struna.

Tjedni nakon tog rezultata bili su napeti i grozničavi. Plesser i ja znali smo da smo naišli na važan nov aspekt fizike struna. Dokazali smo da teorija struna bitno mijenja blisku povezanost geometrije i fizike koju je prvotno uspostavio Einstein. Drastično različiti geometrijski oblici koji bi u općoj teoriji relativnosti implicirali različita fizikalna svojstva – u teoriji struna daju identičnu fiziku. No, što ako smo negdje pogriješili? Što ako im se fizikalne implikacije razlikuju na neki istančan način koji nam je promakao? Na primjer, kada smo rezultate pokazali Yauu, on je pristojno ali odlučno ustvrdio da smo zacijelo pogriješili; inzistirao je da su naši rezultati s matematičkog stajališta odviše bizarni da bi bili istiniti. Ta njegova ocjena navela nas je da se zamislimo. Jedno je pogriješiti u nekoj nevažnoj ili skromnoj tvrdnji koja ne privlači mnogo pozornosti. No, naš rezultat značio je neočekivan korak u novom smjeru koji bi zasigurno izazvao jaku

reakciju. Kad bi bio pogrešan, svi bi to doznali.

Napokon, nakon mnogo provjera i ponovnih provjera, samopouzdanje nam je ojačalo i poslali smo članak na objavljivanje. Nakon nekoliko dana, sjedio sam u svom uredu na Harvardu kad je zazvonio telefon. Bio je to Philip Candelas s Teksaškog državnog sveučilišta; odmah me upitao sjedim li. Sjedio sam. Zatim mi je rekao da su on i dvojica njegovih studenata, Monika Lynker i Rolf Schimmrigk, otkrili nešto što će me srušiti sa stolca. Pomnim istraživanjem velikog uzorka Calabi-Yauovih prostora koji su generirali u računalu, pronašli su da su gotovo svi u parovima koji se razlikuju upravo po razmjeni broja neparnih i parnih rupa. Rekao sam mu da još sjedim – i da smo Plesser i ja došli do istog rezultata. Pokazalo se da su Candelasov i naš rad komplementarni; mi smo otišli korak dalje, pokazavši da je ukupna fizika u zrcalnom paru identična, dok su Candelas i njegovi studenti dokazali da znatno veći uzorak Calabi-Yauovih

prostora spada u zrcalne parove. U ta dva članka otkrili smo zrcalnu simetriju teorije struna.[7]

Fizika i matematika zrcalne simetrije

Slabljenje Einsteinove krute i jedinstvene povezanosti geometrije prostora i opažene fizike jedna je od neočekivanih promjena paradigme u teoriji struna. No, ta evolucija znači mnogo više od promjene filozofskog stajališta. Konkretno, zrcalna simetrija moćna je alatka za razumijevanje fizike teorije struna i matematike Calabi-Yauovi prostora.

Matematičari koji rade na polju algebarske geometrije proučavali su Calabi-Yauove prostore iz čisto matematičkih razloga mnogo prije otkrića teorije struna. Razradili su mnoga detaljna svojstva tih prostora ne težeći nikakvim budućim primjenama u fizici. No, pokazalo se da je matematičarima teško u cijelosti razviti neke aspekte Calabi-Yauovih

prostora – u biti i nemoguće. Ali otkriće zrcalne simetrije u teoriji struna bitno je promijenilo tu situaciju. U biti, zrcalna simetrija znači da su pojedini parovi Calabi-Yauovih prostora, parovi za koje se prethodno mislilo da su posve nepovezani, sada blisko povezani u teoriji struna. Povezuje ih zajednički fizikalni univerzum koji oba impliciraju ako je bilo koji od njih odabran po dodatnim uvijenim dimenzijama. Ta međupovezanost, na koju nitko prije nije pomislio, pruža važnu novu fizikalnu i matematičku alatku.

Na primjer, zamislimo da marljivo računamo fizikalna svojstva – mase čestica i naboje sila – povezana s jednim mogućim Calabi-Yauovim izborom dodatnih dimenzija. Ne zanima nas hoće li se naši rezultati baš savršeno poklapati

---

7 Izraz zrcalna simetrija koristi se i u drugim, posve drukčijim kontekstima u fizici, kao što je pitanje kiralnosti – to jest, je li svemir simetričan "lijevo-desno" – što smo raspravili u bilješci 7 za poglavlje 8.

s eksperimentima, jer smo vidjeli da je to zasad teško postići zbog velikog broja teorijskih i tehnoloških prepreka. Zato tad izvodimo misaoni eksperiment koji se odnosi na to kako *bi* svijet izgledao kad bi određeni Calabi-Yauov prostor *bio* odabran. Neko vrijeme sve ide kako treba, ali tada, usred rada naiđemo na matematički proračun koji je tako zahtjevan da ga nije moguće izvesti. Nitko, čak ni najbolji matematičari na svijetu, ne zna što dalje. Zapeli smo u slijepoj ulici. No, tada shvatimo da taj Calabi-Yau ima zrcalnog partnera. Budući da je fizika struna u oba člana zrcalnog para identična, shvaćamo da proračune možemo izvoditi u bilo kojemu od njih. I tako, onaj težak proračun u prvotnom Calabi-Yauovom prostoru preradimo tako da se odnosi na njegova zrcalnog člana, jer smo sigurni da će rezultat proračuna – njegova fizika – biti jednak. Na prvi pogled mogli bismo pomisliti da će prerađena verzija proračuna biti jednako teška kao i prvotna. No, čeka nas ugodno i važno iznenađenje: otkrivamo da, iako će rezultat biti isti, oblik

proračuna posve je drukčiji, a u nekim slučajevima se nepremostivo težak proračun s kojim smo počeli pretvara u vrlo lagan proračun o Calabi-Yauovu prostoru. Ne postoji jednostavno objašnjenje zašto se to događa, ali se događa – barem za neke proračune – a pojednostavljenje može biti dramatično. Jasno je što to znači: više nismo u slijepoj ulici.

To je otprilike kao da netko zatraži da precizno prebrojite sve naranče koje su nasumično istresene u golem kontejner, dug i širok 15 metara i 3 metra dubok. Počinjete brojiti jednu po jednu, ali ubrzo shvatite da je zadatak naprosto pretežak. No srećom, dolazi vam prijatelj koji je bio prisutan kad su naranče bile isporučene. On vam kaže da su pristigle uredno zapakirane u malenim kutijama (a jednu od njih on baš ima u ruci), naslaganim u kvadar dugačak 20 kutija, širok 20 kutija i 20 kutija visok. Ne treba vam dugo da izračunate da su stigle u ukupno 8 000 kutija i da morate odrediti samo koliko naranči je bilo zapakirano u svakoj od njih. To ćete

lako učiniti tako da posudite prijateljevu kutiju i napunite je narančama: tako ćete svoj golem zadatak brojanja obaviti gotovo bez napora. U biti, pametnom preradom proračuna uspjeli ste ga izvesti znatno lakše.

Slična je situacija s mnogim proračunima u teoriji struna. Iz perspektive Calabi-Yauova prostora, proračun može sadržavati golem broj teških matematičkih koraka. No kada se proračun prevede u njegova zrcalnog člana, on se reorganizira na mnogo djelotvorniji način i može se obaviti relativno lako. To smo istaknuli Plesser i ja, a u praksi su potom proveli Candelas i njegove suradnice Xenia de la Ossa i Linda Parkes s Teksaškog sveučilišta i Paul Green sa sveučilišta države Maryland. Dokazali su da se gotovo nezamislivo teški proračuni mogu izvesti služeći se zrcalnom perspektivom, s nekoliko stranica algebre na stolnom računalu.

To je bilo posebno važno otkriće za matematičare jer su neki od tih proračuna bili upravo oni s kojima godinama nisu znali što početi. Teorija struna pretekla ih je s rješe-

njem – tako su barem tvrdili fizičari.

Sad biste trebali imati na umu da između matematičara i fizičara postoji jaka, ali uglavnom prijateljska konkurencija. Kako se pokazalo, dva norveška matematičara – Geir Ellingsrud i Stein Arild Strømme – radili su na jednom od mnogih proračuna koje su Candelas i suradnice svladali zrcalnom simetrijom. Pojednostavljeno rečeno, trebalo je izračunati broj sfera koje se može "ugurati" u određeni Calabi-Yauov prostor, donekle nalik na našu analogiju s brojanjem naranči u velikom kontejneru. Na susretu fizičara i matematičara u Berkeleyju 1991. Candelas je objavio rezultat do kojeg je njegova skupna došla teorijom struna i zrcalnom simetrijom: 317 206 375. Ellingsrud i Strømme objavili su rezultat svog, vrlo zahtjevnog matematičkog proračuna: 2 682 549 425. Matematičari su danima raspravljali: tko ima pravo? To pitanje pretvorilo se u pravi lakmus-test za kvantitativnu pouzdanost teorije struna. Neki ljudi čak su

tvrdili – pomalo i zlobno – da je to tek nešto manje dobro od prave usporedbe teorije struna s eksperimentom. Štoviše, Candelasovi rezultati nadilazili su onaj jedan brojčani rezultat koji su Ellingsrud i Strømme tvrdili da su izračunali. On i suradnice tvrdili su da su odgovorili i na mnoga druga pitanja, koja su bila još mnogo teža – zapravo, toliko teška da nijedan matematičar nije ni pokušao razmotriti ih. No, može li se vjerovati rezultatima teorije struna? Susret je završio plodnom razmjenom mišljenja između matematičara i fizičara, ali diskrepancija nije bila razriješena.

Oko mjesec dana potom, među sudionicima susreta na Berkeleyju cirkulirala je e-mail poruka s temom Fizika je pobijedila! Ellingsrud i Strømme pronašli su pogrešku u svom računalnom programu, a kad su je ispravili, potvrdili su Candelasov rezultat. Otad je provedeno mnogo matematičkih provjera kvantitativne pouzdanosti zrcalne simetrije u teoriji struna. Sve ih je prošla s lakoćom. U novije vrijeme, gotovo deset godina nakon što su fizičari otkrili zrcalnu si-

metriju, matematičari su načinili velik napredak u otkrivanju njezinih inherentnih matematičkih temelja. Služeći se bitnim spoznajama matematičara kao što su Maksim Koncevič, Jurij Manjin, Gang Tian, Jun Li i Alexander Givental, Yau i njegovi suradnici Bong Lian i Kefeng Liu napokon su pronašli strog matematički dokaz formula upotrijebljenih za brojanje sfera unutar Calabi-Yauovih prostora, te tako riješili probleme koji su matematičare mučili stoljećima.

Osim tog konkretnog uspjeha, to otkriće zapravo ističe ulogu koju je fizika počela imati u modernoj matematici. Fizičari već odavno "prekapaju" matematičke arhive u potrazi za alatkama za gradnju i analizu modela fizikalnoga svijeta. Otkrićem teorije struna fizika počinje plaćati svoj dug matematici i matematičarima nuditi nove, plodne pristupe njihovim neriješenim problemima. Teorija struna ne pruža ujedinjujući okvir samo za fiziku, nego bi mogla iskovati jednako duboko jedinstvo i s matematikom.

JEDANAESTO POGLAVLJE

Kidanje tkiva prostora

Budete li neumorno rastezali gumenu opnu, ona će prije ili kasnije pući. Ta jednostavna činjenica godinama je poticala mnoge fizičare da se zapitaju može li isto vrijediti i za tkivo prostora koje čini svemir. Naime, može li se tkivo prostora poderati ili je to samo pogrešno poimanje koje nastaje kada se analogija gumene opne shvati preozbiljno?

Einsteinova opća teorija relativnosti kaže: ne, tkivo prostora ne može se pocijepati.[1] Jednadžbe opće teorije relativnosti čvrsto su ukorijenjene u Riemannovoj geometriji, a kao što smo rekli u prethodnom poglavlju, taj okvir analizira iskrivljenja između međusobno bliskih lokacija u prostoru. Da bismo smisleno govorili o tim odnosima udaljenosti, potreban matematički formalizam zahtijeva da supstrat prostora bude "gladak" – što je izraz sa strogo matematički definiranim značenjem, ali njegova svakodnevna upotreba dobro opisuje njegovu bit: bez nabora, bez pukotina, bez "zalijepljenih" posebnih dijelova i bez razderotina. Kad bi u

---

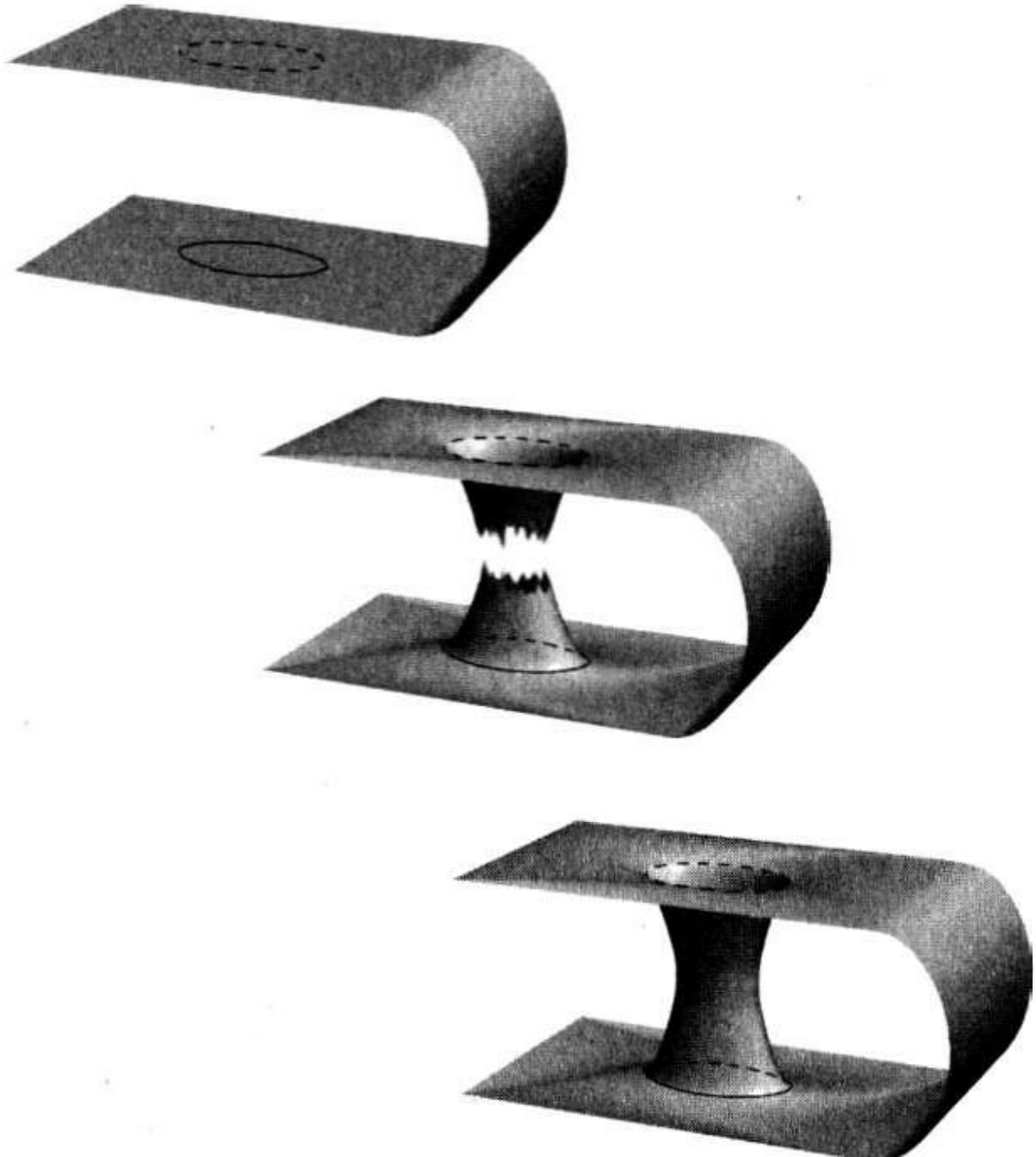
[1] Matematici sklon čitatelj uvidjet će da pitamo je li ta topologija prostora dinamička – to jest, može li se mijenjati. Napominjemo da, iako se često služimo jezikom dinamičke topološke promjene, u praksi obično razmatramo jednoparametarsku porodicu *prostorvremenâ* čija se topologija mijenja kao funkcija tog parametra. Strogo stručno rečeno, taj parametar nije vrijeme, ali se u određenim granicama u biti može izjednačiti s vremenom.

tkivu prostora nastale takve nepravilnosti, jednadžbe opće teorije relativnosti urušile bi se, što bi naznačilo neku vrstu kozmičke katastrofe – a naš očito pristojan svemir uspješno izbjegava takvu sudbinu.

To ne sprečava maštovite teoretičare da troše godine na razmatranje mogućnosti da bi neka nova formulacija fizike koja nadilazi klasičnu Einsteinovu teoriju i uključuje kvantnu fiziku mogla dokazati da se mreškanja, pukotine i stapanja tkiva prostora mogu pojaviti. Zapravo, spoznaja da kvantna fizika vodi do silovitih titraja na kratkim udaljenostima navela je neke na spekulacije da bi mreškanja i pukotine mogle biti uobičajeno mikroskopsko svojstvo tkiva prostora. Pojam *crvotočine* (pojam koji dobro pozna svaki ljubitelj *Zvjezdanih staza*) rezultat je takvih spekulacija. Ideja je jednostavna: zamislite da ste direktor velike korporacije s centralom na devedesetom katu jednog od tornjeva Svjetskog trgovinskog centra u New Yorku. Zakučasti putovi korporacijskog razvoja htjeli su da morate sve češće

putovi korporacijskog razvoja htjeli su da morate sve češće kontaktirati upravo s granom vaše tvrtke na devedesetom katu drugoga tornja. Budući da je nepraktično seliti urede, na pamet vam pada prirodan prijedlog: izgradite most od jednog do drugog ureda koji povezuje dva tornja. Tako bi se zaposleni mogli slobodno kretati iz ureda u ured a da ne moraju silaziti i penjati se devedeset katova.

Crvotočina igra sličnu ulogu: to je most ili tunel koji nudi prečac iz jednog područja svemira u drugo. Služeći se dvodimenzionalnim modelom, zamislimo da je svemir oblika kao na slici 11.1. Ako su uredi vaše korporacije smješteni blizu nižega kruga na slici 11.1(a), onda u svoj terenski ured, smješten blizu gornjega kruga, možete doći samo tako da prijeđete cijeli put u obliku slova U, što vas vodi od jednog do drugog kraja svemira. No ako se tkivo prostora može poderati, pri čemu nastaju pukotine kao na slici 11.1(b), i ako te pukotine mogu "ispustiti" ticala koja se spajaju kao na 11.1(c), onda bi prostorni most povezao područja koja su



Slika 11.1 (a) U univerzumu "u obliku slova U" jedini način da dođete s jednoga na drugi kraj jest da prijeđete cijeli svemir. (b) Tkivo prostora puca i dva kraja crvotočine počinju rasti. (c) Krajevi crvotočine spajaju se i čine nov most – prečac – iz jednoga kraja univerzuma u drugi.

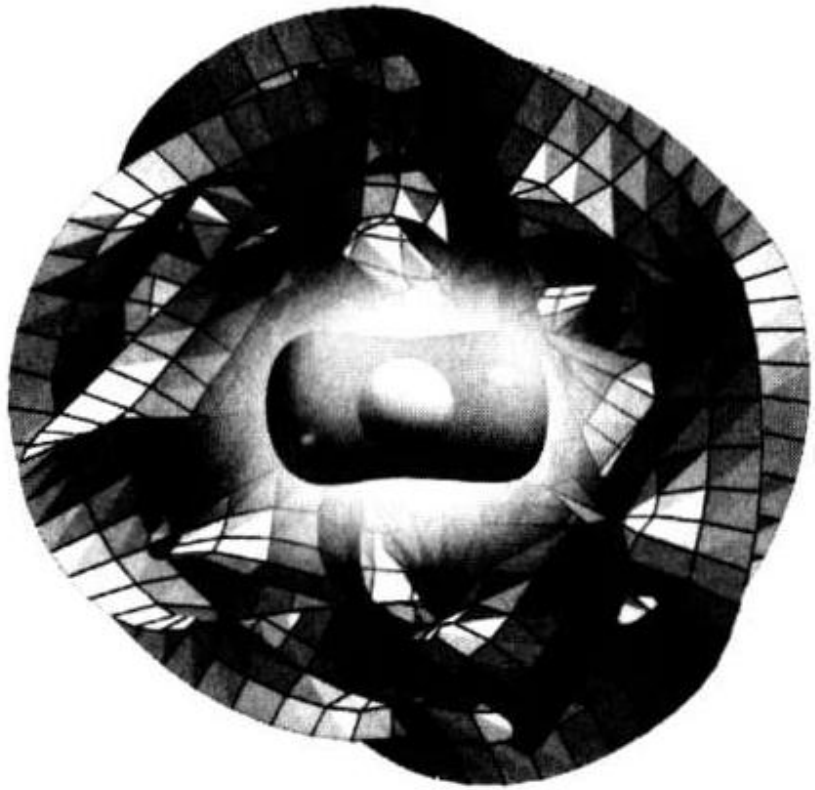
prije bila daleka. To je crvotočina. Trebali biste uočiti da crvotočina ima sličnosti s mostom između tornjeva Svjetskog trgovinskog centra, ali jedna je bitna razlika: most Svjetskog trgovinskog centra prolazio bi kroz područje *postojećeg* prostora – prostora između dvaju tornjeva. Suprotno tome, crvotočina stvara *novo* područje prostora jer je zakrivljeni dvodimenzionalni prostor na slici 11.1(a) *sve* što postoji (u kontekstu naše dvodimenzionalne analogije). Područja oko opne samo ističu neprikladnost ilustracije, koja prikazuje univerzum u obliku slova U kao da je predmet u našeg višedimenzionalnom univerzumu. Crvotočina stvara nov prostor i stoga ocrtava nov prostorni teritorij.

Postoje li crvotočine u svemiru? To nitko ne zna. A ako postoje, posve je nejasno mogu li poprimiti samo mikroskopski oblik ili se mogu prostirati preko velikih svemirskih prostranstava (kao u *Zvjezdanim stazama*). No, bitan element u procjeni jesu li one činjenica ili fikcija je pitanje može li se tkivo prostora poderati ili ne može.

Crne rupe su još jedan uvjerljiv primjer u kojemu se tkivo prostora rasteže do krajnjih granica. Na slici 3.7 vidjeli smo da golemo gravitacijsko polje crne rupe rezultira ekstremnom zakrivljenošću, tako da se *čini* da je tkivo prostora probušeno u središtu crne rupe. Za razliku od crvotočina, postoje jaki empirijski dokazi za postojanje crnih rupa, pa je pitanje što se doista događa u njihovoj središnjoj točki pitanje za znanost, a ne za spekulacije. Kao što smo već rekli, jednadžbe opće teorije relativnosti urušavaju se u takvim, ekstremnim uvjetima. Neki fizičari sugerirali su da proboj doista postoji, ali od te kozmičke "singularnosti" štiti nas horizont događaja crne rupe, koji sprečava da išta pobjegne iz njezina gravita-

cijskog stiska. Ta logika navela je Rogera Penrosea s Oxforda da spekulira o "hipotezi kozmičke cenzure" koja omogućuje da se takve prostorne nepravilnosti pojavljuju samo ako ih koprena horizonta događaja skriva od našeg pogleda. S druge strane, neki fizičari prije otkrića teorije struna nagađali su da bi prava fuzija kvantne mehanike i opće teorije relativnosti pokazala da se prividan proboj prostora izravnava – "zašiva", da se tako izrazimo – zbog kvantnih djelovanja.

Otkrićem teorije struna i skladnim spojem kvantne mehanike i gravitacije napokon smo u stanju proučavati ta pitanja. Teoretičari struna još ne mogu u potpunosti odgovoriti na njih, ali u proteklim godinama riješena su neka blisko povezana pitanja. U ovom poglavlju raspravljamo o tome kako teorija struna prvi put nedvosmisleno pokazuje da postoje fizikalne okolnosti – u nekim aspektima drukčija od crvotočina i crnih rupa – u kojima se tkivo prostora *može* pocijepati.



Slika 11.2 Osvijetljeno područje unutar Calabi-Yauova oblika sadrži sferu.

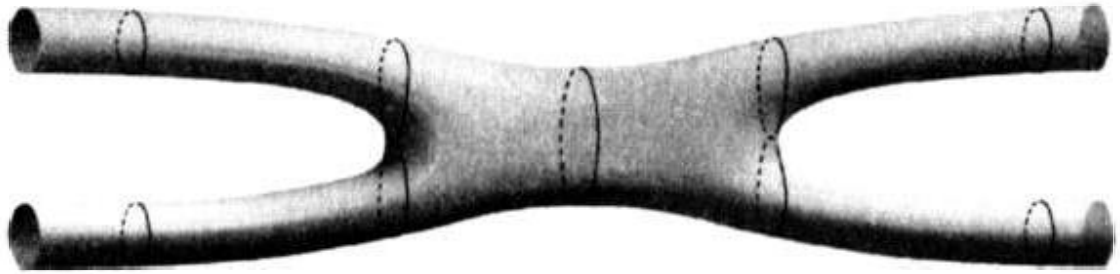
Fascinantna mogućnost

Godine 1987. su Shing-Tung Yau i njegov student Gang Tian, sada na MIT-u, došli do zanimljive matematičke spo-

znaje. Služeći se dobro poznatim matematičkim postupkom, otkrili su da se neke Calabi-Yauove oblike može transformirati u druge tako da im se probuši površina, a tako nastala rupa se potom zašije u skladu s preciznim matematičkim obrascem.[2] Pojednostavljeno govoreći, identificirali su osobitu vrstu dvodimenzionalne sfere – poput površine lopte – koja sjedi u početnom Calabi-Yauovom prostoru, kao na slici 11.2. (Lopta, poput svih poznatih predmeta, trodimenzionalna je. No, ovdje mislimo samo na njenu površinu; zanemarujemo debljinu materijala od kojega je izrađena, kao i prostor koji obuhvaća. Točke na površini lopte može se locirati tako da im se pripiše dva broja – "širinu" i "dužinu" – kao što lociramo točke na površini Zemlje. Zato je

---

[2] Za matematički obrazovanog čitatelja: taj postupak uključuje približavanje racionalnih krivulja u Calabi-Yauovoj mnogostrukosti i oslanjanje na činjenicu da se, u određenim okolnostima, rezultirajuća singularnost može popraviti odvojenim malim rezolucijama.



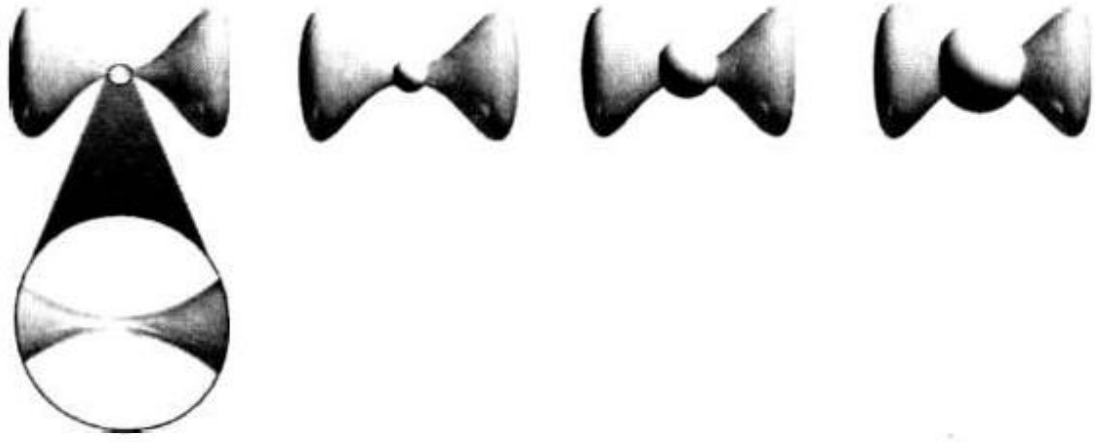
Slika 11.3 Sfera unutar Calabi-Yauova prostora smanjuje se sve do točke, čime se "uštipne" tkivo prostora. Ovu i sljedeće slike pojednostavljujemo tako što prikazujemo samo dio potpunog Calabi-Yauovog oblika.

površina lopte *dvo*dimenzionalna, poput površine vrtnoga crijeva o kojoj smo raspravljali u prethodnim poglavljima.) Zatim su razmotrili smanjivanje sfere sve dok se ne stegne u jednu točku, što ilustriramo nizom oblika na slici 11.3. Ta slika, kao i sljedeće u ovom poglavlju, pojednostavljena je tako što smo se usredotočili na najrelevantniji "komad" Calabi-Yauovog oblika, ali ne zaboravite da se te transformacije oblika odvijaju u nešto većem Calabi-Yauovom obli-

ku, kao na slici 11.2. I na kraju, Tian i Yau zamislili su blago kidanje Calabi-Yauovog oblika na mjestu stanjivanja (slika 11.4(a), otvarajući ga i uljepljujući drugi oblik nalik na loptu (slika 11.4(b)), koju tada mogu velikodušno napuhati (slike 11.4(c) i 11.4(d)).

Taj niz manipulacija matematičari zovu *inverzni prijelaz*. To je kao da se prvotni oblik lopte "izvrnuo" u novu orijentaciju unutar ukupnog Calabi-Yauovog oblika. Yau, Tian i drugi primijetili su da se u određenim okolnostima, novi Calabi-Yauov oblik stvoren izvrtanjem, kao na slici 11.4(d), topološki razlikuje od početnog Calabi-Yauovog prostora na slici 11.3(a). To je samo stručan način da se kaže da se početni Calabi-Yauov prostor sa slike 11.3(a) apsolutno nikako ne može deformirati u konačni Calabi-Yauov prostor na slici 11.4(d) a da se ne pocijepa tkivo Calabi-Yauovog prostora u nekoj prijelaznoj fazi.

S matematičkog stajališta, taj postupak Yaua i Tiana zanimljiv je jer nudi način da se nove Calabi-Yauove prostore



Slika 11.4 "Uštipnut" Calabi-Yauov prostor otvara se i ispušta sferu koja mu izravnava površinu. Prvotna sfera sa slike 11.3 se "preobrnula".

proizvede iz onih koji su nam poznati. No njegov istinski potencijal krije se na području fizike, gdje postavlja intrigantno pitanje: je li moguće da se apstraktni matematički postupak, niz prikazan od slike 11.3(a) do slike 11.4(d), doista pojavljuje i u prirodi? Je li moguće da se, suprotno Einsteinovim spekulacijama, tkivo prostora može poderati i potom zakrpati na opisani način?

Dvije godine nakon tog otkrića iz 1987, Yau me je svako malo poticao da razmišljam o mogućim fizikalnim utjelovljenjima tih inverznih prijelaza. No, nisam to činio. Činilo mi se da su inverzni prijelazi samo apstraktna matematika koja nema mnogo veze s teorijom struna. Zapravo, na temelju rasprave u poglavlju 10, u kojoj smo zaključili da kružne dimenzije imaju minimalni polumjer, mogli bismo pasti u iskušenje da kažemo da teorija struna ne dopušta da se sfera sa slike 11.3 smanji sve do "uštipnute" točke. No ne zaboravimo, što smo također uočili u poglavlju 10, da ako se djelić prostora uruši – u ovom slučaju, sferični djelić Calabi-Yauovog prostora – za razliku od urušavanja cijele prostorne dimenzije, argument o poistovjećenju velikih i malih polumjera ne može se izravno primijeniti. No ipak, premda ta

zamisao o isključenju inverznih prijelaza ne može izdržati analizu, mogućnost da bi se tkivo prostora moglo pocijepati doimala se prilično malo vjerojatnom.

No malo poslije, godine 1991, norveški fizičar Andy Lütken, s Paulom Aspinwallom, mojim studentom s Oxforda, a danas profesorom na sveučilištu Duke, postavili su pitanje koje se pokazalo vrlo zanimljivim: kad bi prostorno tkivo Calabi-Yauovog dijela našeg univerzuma bilo podvrgnuto inverznom prijelazu koji cijepa prostor, kako bi to izgledalo iz perspektive zrcalnog Calabi-Yauovog prostora? Da bismo razumjeli motivaciju za to pitanje, moramo se prisjetiti da fizika koja se pojavljuje u oba člana zrcalnog para Calabi-Yauovih oblika (ako gledamo dodatne dimenzije) identična, ali zamršenost matematike koju fizičar mora primijeniti da bi dokučio tu fiziku može se znatno razlikovati između prvog i drugog člana u paru. Aspinwall i Lütken spekulirali su da bi matematički kompliciran prijelaz sa slika 11.3 i 11.4 mogao imati mnogo jednostavniji zrcalni opis – koji bi pru-

žio jasniji pogled na fiziku o kojoj je riječ.

U vrijeme njihova rada zrcalna simetrija nije bila poznata u stupnju koji je potreban da bi se odgovorilo na to njihovo pitanje. Međutim, Aspinwall i Lütken uočili su da se čini da u zrcalnom opisu nema ničega što bi sugeriralo katastrofalne fizikalne posljedice koje se povezuje s prostornim cijepanjem u inverznim prijelazima. Dobro je poznata matematička činjenica da lijepljenje raznih točaka kao na slici 10.4 – postupak kojim se konstruiraju zrcalni parovi – vodi do geometrijskih situacija koje su identične štipanju i bušenju na slikama 11.3 i 11.4. No, s fizikalnog stajališta, Plesser i ja nismo uspjeli pronaći nikakvu sličnu opasnost. Štoviše, nadahnuti primjedbama Aspinwalla i Lütkena (kao i njihovim prethodnim radom s Grahamom Rossom), Plesser i ja shvatili smo da bismo poderotinu mogli matematički zakrpati na dva načina. Prvi način vodio je do Calabi-Yauovog oblika na slici 11.3(a), a drugi do oblika na slici 11.4(d). Sto-

ga smo pomislili da bi razvoj sa slike 11.3(a) do slike 11.4(d) mogao biti nešto što se doista događa i u prirodi.

Krajem 1991, barem nekoliko teoretičara struna imali su jak dojam da se tkivo prostora *može* poderati. No nitko nije imao tehnička sredstva da definitivno potvrdi ili pobije tu frapantnu mogućnost.

Polagano napredovanje

Plesser i ja smo tijekom 1992. povremeno pokušavali pokazati da tkivo prostora može biti podvrgnuto inverznim prijelazima koji cijepaju prostor. Naši izračuni davali su indicije koje su nas ohrabrivale, ali nismo uspijevali pronaći konačan dokaz. Negdje u proljeće, Plesser je posjetio Institut za napredna istraživanja u Princetonu kako bi održao predavanje, i tada je privatno obavijestio Wittena o našim novim pokušajima da ostvarimo matematiku inverznih

prijelaza koji cijepaju prostor u okviru fizike teorije struna. Kad je ukratko iznio naše zamisli, Plesser je čekao Wittenov odgovor. Witten se okrenuo od školske ploče i zagledao se kroz prozor svog ureda. Nakon minutu ili dvije šutnje, okrenuo se prema Plesseru i rekao mu da bi bilo "spektakularno" kad bi se njegove ideje ostvarile. To nas je osokolilo da nastavimo. No nakon nekog vremena, kad nismo dalje napredovali, ipak smo se vratili radu na drugim projektima u okviru teorije struna.

No ipak sam i dalje razmišljao o mogućnosti tih inverznih prijelaza koji cijepaju prostor. Kako su prolazili mjeseci, bio sam sve sigurniji da inverzni prijelazi moraju biti integralni dio teorije struna. Na temelju preliminarnih izračuna koje smo izveli Plesser i ja, nakon vrlo korisnih rasprava s Davidom Morrisonom, matematičarom sa sveučilišta Duke, činilo se da je to jedini zaključak koji zrcalna simetrija podupire po prirodi stvari. Zapravo, kad sam po-

sjetio Duke, Morrison i ja, uz pomoć korisnih primjedaba Sheldona Katza sa sveučilišta države Oklahome, koji je tada također bio u posjeti Dukeu, koncipirali smo strategiju kojom bismo dokazali da su inverzni prijelazi u teoriji struna mogući. No kad smo sjeli kako bismo obavili potrebne izračune, vidjeli smo da su neobično zahtjevni. Čak i najbržem računalu na svijetu bilo bi potrebno više od stoljeća da ih izvede. Napredovali smo, ali bilo je jasno da nam treba nova zamisao, koja bi znatno poboljšala efikasnost naše metode računanja. Takvu zamisao nesvjesno nam je otkrio Victor Batyrev, matematičar sa sveučilišta u Essenu, kad je objavio dva članka u proljeće i ljeto 1992.

Batyrev se jako zainteresirao za zrcalnu simetriju, posebno nakon što su Candelas i suradnici njome riješili problem brojanja sfera, opisan na kraju poglavlja 10. No, iz matematičke perspektive, Batyrevu se nisu sviđale metode kojima smo Plesser i ja pronašli zrcalne parove Calabi-Yauovih prostora. Iako smo se poslužili sredstvima koja su poznata

teoretičarima struna, Batyrev mi je poslije rekao da ga se naš članak dojmio poput "crne magije". To je odraz dubokog kulturološkog jaza između fizike i matematike, a kako teorija struna briše granice između njih, velike razlike u jeziku, metodama i stilu tih struka postaju sve očitije. Fizičari su više nalik avangardnim kompozitorima, spremnim na kršenje tradicionalnih pravila i probijanje granica prihvatljivosti u potrazi za rješenjima. Matematičari su pak nalik klasičnim kompozitorima, koji rade u mnogo užem okviru, i nisu spremni na sljedeći korak sve dok se prethodni ne učvrste s najvećom strogošću. Oba pristupa imaju prednosti i mane; oba nude jedinstven ventil za stvaralačka otkrića. Poput moderne i klasične glazbe, ne može se reći da je jedan pristup ispravan, a drugi pogrešan – metode kojima se služe uglavnom su stvar ukusa i obrazovanja.

Batyrev se bacio na posao kako bi konstrukciju zrcalnih mnogostrukosti prikazao u konvencionalnijem matemati-

čkom okviru, i uspio je u tome. Nadahnut jednim ranijim radom tajvanskog matematičara po imenu Shi-Shyr Roan, pronašao je sustavnu matematičku proceduru za kreiranje parova Calabi-Yauovih prostora koji su zrcalne slike jedni drugih. Njegova konstrukcija svodi se na postupak koji smo Plesser i ja pronašli u primjerima koje smo razmotrili, ali nudi općenitiji okvir, izražen na način koji je matematičarima prihvatljiviji.

Naličje medalje bilo je u tome što je za razumijevanje Batyrevljevih članaka bilo potrebno poznavati područja matematike za koja fizičari uglavnom nisu ni čuli. Na primjer, ja sam mogao dokučiti srž njegovih tvrdnji, ali teško sam razumijevao mnoge važne pojedinosti. No, jedno je bilo jasno: metoda njegova rada, ako je se dobro razumije i primijeni, mogla bi otvoriti nov smjer napada na pitanje inverznih prijelaza koji cijepaju prostor.

Osokoljen tim razvojem stvari, krajem ljeta odlučio sam se vratiti problemu inverzija novom snagom i bez ometanja. Od

Morrisona sam saznao da odlazi s Dukea kako bi proveo godinu dana na Institutu za napredna istraživanja, a znao sam da bi i Aspinwall mogao biti ondje kao postdoktorand. Nakon nekoliko telefonskih poziva i e-mailova, dobio sam dopust na Sveučilištu Cornell i također proveo jesen 1992. na Institutu.

Pojavljuje se strategija

Teško je prisjetiti se mjesta koje bi bilo tako prikladno za duge sate intenzivne koncentracije kao što je to Institut za napredna istraživanja. Osnovan je 1930. i smješten među blagim obroncima idilične šume, nekoliko kilometara od kampusa sveučilišta Princeton. Govori se da ondje ništa ne može omesti rad na Institutu, jer ondje ničega ni nema.

Kad je izbjegao iz Njemačke, Einstein se 1933. zaposlio na Institutu i ondje ostao cijeli život. Ne treba nam bujna mašta

kako bismo ga zamislili zadubljenog u teoriju ujedinjenog polja u mirnom, usamljeničkom, gotovo asketskom okružju Instituta. Naslijeđe takve misaonosti prožima ozračje Instituta; ovisno o vašem mentalnom stanju, ono može biti ili poticajno ili depresivno.

Nedugo po dolasku na Institut, Aspinwall i ja šetali smo ulicom Nassau (glavnom trgovačkom ulicom gradića Princetona) i pokušavali se dogovoriti gdje ćemo večerati. To uopće nije bilo jednostavno, jer Paul je neobuzdani mesojed, a ja strogi vegetarijanac. Dok smo tako razgovarali o životnim pitanjima, odjednom me je upitao jesam li došao do nekih novih zamisli koje bi trebalo proraditi. Rekao sam mu da jesam i izložio mu svoje stajalište da je važno utvrditi da svemir može prolaziti kroz inverzne prijelaze s cijepanjem prostora, ako ga teorija struna doista opisuje. Obrazložio sam i strategiju kojom sam se služio, kao i svoju novu nadu da bi nam Batyrevljev rad mogao omogućiti da popunimo praznine. Pomislio sam da zapravo držim propovijed neko-

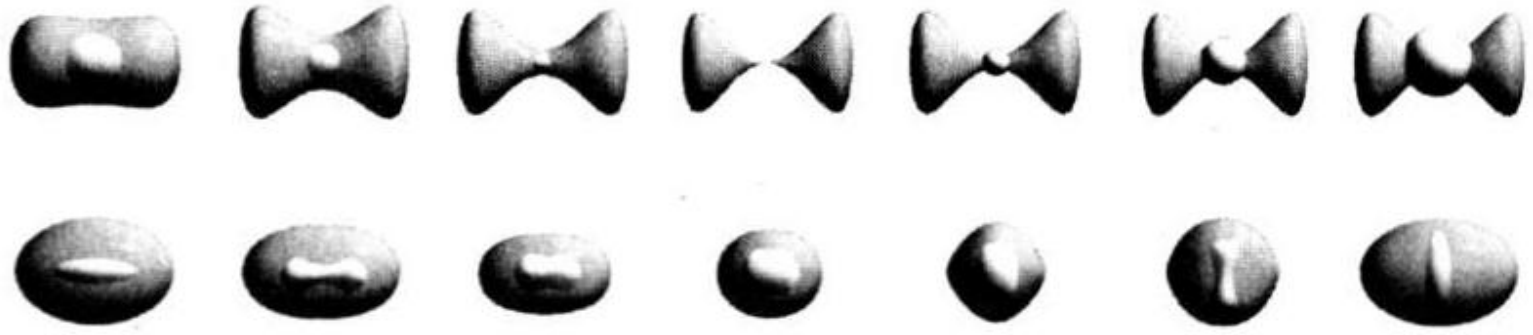
me tko je već preobraćen i da će Paula sigurno zanimati ta mogućnost. No, uopće ga nije zanimala. Danas mi se čini da je ta njegova nesklonost uglavnom bila rezultat naše dobronamjerne i dugotrajne intelektualne igre u kojoj se obojica oštro suprotstavljamo zamislima onoga drugoga. Nakon nekoliko dana se predomislio i posvetili smo prijelazima svu svoju pozornost.

Tada je došao i Morrison pa smo se nas trojica sastali u čajnom salonu Instituta kako bismo formulirali strategiju. Složili smo se da je glavni cilj odrediti može li se razvoj iz slike 11.3(a) u sliku 11.4(d) doista događati u našem svemiru. No, bilo je teško izravno razmatrati tu tematiku, posebno pitanje kad dolazi do cijepanja prostora. Umjesto toga, odlučili smo preoblikovati pitanje služeći se zrcalnim opisom, nadajući se da bi njegove jednadžbe mogle biti podatnije. To je shematski ilustrirano na slici 11.5, na kojoj je gornji red prvotni razvoj iz slike 11.3(a) u sliku 11.4(d), a donji red

je isti razvoj iz perspektive zrcalnih Calabi-Yauovih oblika. Kao što su neki od nas već znali, pokazuje se da se u zrcalnoj varijanti fizika struna savršeno lijepo ponaša i ne uzrokuje nikakve katastrofe. Kao što vidite, čini se da u donjem redu slike 11.5 nema nikakvog štipanja ni cijepanja. Međutim, pravo pitanje na temelju te opservacije glasilo je: jesmo li prekoračili granice primjenjivosti zrcalne simetrije? Iako gornji i donji Calabi-Yauovi oblici nacrtani na lijevoj strani slike 11.5 daju jednaku fiziku, je li istina da su na svakom koraku razvoja prema desnoj strani slike 11.5 – koji nužno prolazi kroz stupanj štipanja, cijepanja i krpanja – fizikalna svojstva originala i zrcalne perspektive identična?

Iako smo imali dobre razloge za vjerovanje da jaki zrcalni odnosi vrijede za razvoj oblika koji vodi do cijepanja gornjeg Calabi-Yauovog oblika na slici 11.5, shvatili smo da nitko ne zna jesu li gornji i donji Calabi-Yauovi oblici zrcalni i nakon cijepanja. To je presudno pitanje, jer ako jesu, onda bi neostvarenje katastrofe u zrcalnoj perspektivi znači-

lo isto i za originalnu, i dokazali bismo da se u teoriji struna prostor može pocijepati. Shvatili smo da se to pitanje može svesti na proračun: izvedimo fizikalna svojstva univerzuma za gornji Calabi-Yauov oblik nakon cijepanja (služeći se, na primjer, Calabi-Yauovim oblikom gore lijevo na slici 11.5) i za njegovu navodnu zrcalnu sliku (Calabi-Yauov oblik dolje desno na slici 11.5) i pogledajmo jesu li jednaki.



Slika 11.5 Inverzni prijelaz s cijepanjem prostora (gornji red) i njegovo pretpostavljeno zrcalno preoblikovanje (donji red).

Sitni sati u posljednjem Einsteinovom brlogu

Britki intelekt Edwarda Wittena izražava se rječitošću koja često probada sugovornika ironijskom oštricom. Općenito ga smatraju Einsteinovim nasljednikom u ulozi najvećeg živućeg fizičara. Neki idu i dalje te ga opisuju kao najvećeg fizičara svih vremena. Nezasitno žudi za najzamršenijim fizikalnim problemima i ima velik utjecaj na smjer istraživanja na području teorije struna.

Njegova produktivnost legendarna je po svom opsegu i prodornosti. Njegova supruga Chiara Nappi, također fizičarka na Institutu, prikazuje ga kako sjedi za kuhinjskim stolom i mentalno istražuje granice znanja o teoriji struna, povremeno uzimajući papir i olovku kako bi provjerio kakvu zakučastu pojedinost.[3] Drugu priču pripovijeda postdoktorand koji je jednoga ljeta imao ured do Wittenovog. On opisuje grozničav rad na složenim proračunima teorije struna, praćen neumornim ritmičnim tipkanjem Witteno-

ve tipkovnice iz koje izviru revolucionarni radovi, jedan za drugim.

Oko tjedan dana nakon mog dolaska Witten i ja čavrljali smo u dvorištu Instituta. Pitao me je o mojim istraživačkim planovima. Rekao sam mu za inverzne prijelaze s cijepanjem prostora i za strategiju kojom smo se kanili poslužiti. Živnuo je kad je čuo te zamisli, ali istaknuo je da misli da će proračuni biti užasno teški. Naglasio je i moguću slabu točku u strategiji koju sam opisao, a koja se odnosila na rad od prije nekoliko godina s Vafom i Warnerom. Pokazalo se da je pitanje koje je postavio imalo samo perifernu važnost za naš pristup inverznim prijelazima, ali ono ga je potaknulo da razmišlja o onome što se na kraju pokazalo srodnim i komplementarnim problemima.

Aspinwall, Morrison i ja odlučili smo podijeliti proračune na dva dijela. Na početku se činilo da bi najprirodnije

---

3 K. C. Cole, *New York Times Magazine*, 18. listopada 1987, str. 20.

bilo prvo razbistriti fiziku koja se odnosi na konačni Calabi-Yauov oblik iz gornjeg reda slike 11.5, a zatim učiniti isto za konačni Calabi-Yauov oblik iz donjeg reda slike 11.5. Ako zrcalni odnos nije poremećen cijepanjem u gornjem Calabi-Yauu, onda bi ta dva konačna Calabi-Yauova oblika trebala dati identičnu fiziku, isto kao i dva početna Calabi-Yauova oblika iz kojih su se razvili. (Takvim izražavanjem problema izbjegavaju se vrlo teški proračuni gornjeg Calabi-Yauovog oblika u trenutku kad se cijepa.) No pokazalo se da je izračunavanje fizike povezane s konačnim Calabi-Yauovim oblikom u gornjem redu prilično jednostavno. Prava poteškoća u izvođenju tog programa krije se u tome da se prvo dokuči *precizan oblik* konačnog Calabi-Yauovog prostora u donjem redu 11.5 – navodnom zrcalnom prostoru gornjeg Calabi-Yaua – te da se potom izvede njegova fizika.

Postupak za obavljanje drugog zadatka – izvođenje fizikalnih svojstava konačnog Calabi-Yauovog prostora u donjem redu kad se precizno dozna njegov oblik – razra-

dio je Candelas nekoliko godina ranije. No njegov pristup zahtijeva veliku računalnu snagu i shvatili smo da bi nam za naš primjer trebao poseban računalni program. Toga se prihvatio Aspinwall, koji je i pravi haker osim što je ugledan fizičar. Morrison i ja bacili smo se na prvi zadatak, to jest, na određivanje preciznog oblika navodnog zrcalnog Calabi-Yauovog prostora.

Tu smo zaključili da nam Batyrevljev rad daje neke važne naznake. No, kulturološki jaz između matematike i fizike opet nam je ometao napredovanje. Trebali smo udružiti snage tih dviju struka kako bismo pronašli *matematički* oblik Calabi-Yauovih oblika iz donjeg reda koji bi odgovarali istom *fizikalnom* univerzumu kao i gornji Calabi-Yauovi oblici, ako su inverzna cijepanja doista u repertoaru prirode. No nitko od nas nije dovoljno dobro govorio jezik one druge struke da bi jasno vidio put prema cilju. Postalo nam je očito da smo bili previše razmaženi: morali smo bo-

lje prostudirati struku onoga drugoga. I tako smo provodili dane radeći što smo bolje mogli na proračunima, a navečer smo bili profesor i student u razredu koji se sastojao od jednog profesora i jednog učenika: ja bih sat ili dva predavao Morrisonu o relevantnoj fizici, a potom bi mi on predavao o relevantnoj matematici. Škola bi obično završila oko jedanaest sati navečer.

Držali smo se tog programa, iz dana u dan. Napredovali smo polako, ali osjećali smo da stvari počinju dolaziti na svoja mjesta. U međuvremenu, Witten je znatno napredovao u formuliranju slabe točke koju je prije pronašao. Uspostavljao je novu, snažniju metodu za prevođenje s jezika teorije struna na jezik matematike Calabi-Yauovih prostora i obratno. Aspinwall, Morrison i ja gotovo svakodnevno smo se sastajali s Wittenom i on nam je govorio o novim saznanjima koja su slijedila iz njihova pristupa. Kako su prolazili tjedni, postupno je postajalo jasnije da se njegov rad, iako se zasnivao na posve drukčijem polazištu od našeg, približava

zasnivao na posve drukčijem polazištu od našeg, približava našemu kad je riječ o pitanju inverznih prijelaza. Aspinwall, Morrison i ja shvatili smo da će nas Witten preteći ako ubrzo ne dovršimo svoje proračune.

O pivu i radnim vikendima

Fizičaru najbolji poticaj daje zdrava doza konkurencije. Aspinwall, Morrison i ja ubacili smo u petu brzinu. Treba napomenuti da je to Morrisonu i meni značilo jedno, a Aspinwallu nešto posve drugo. Aspinwall je neobičan spoj senzibliteta britanske više klase, koji je stekao na desetogodišnjem studiju na Oxfordu, i dodiplomskom i postdiplomskom, i mangupske sklonosti nepodopštinama. Što se tiče radnih navika, on je vjerojatno najciviliziraniji fizičar kojeg znam. Dok mnogi od nas rade do sitnih sati, on nikad ne radi poslije pet sati popodne. Dok mnogi od nas rade i vi-

kendom, on to nikad ne čini. To mu uspijeva jer je bistar i efikasan. Ubaciti u petu brzinu za njega je značilo samo povisiti efikasnost, a ne raditi dulje.

To je bilo već početkom prosinca. Morrison i ja već nekoliko mjeseci držali smo predavanja jedan drugome i to je počelo davati plodove. Bili smo vrlo blizu uspjeha u određivanju preciznog oblika Calabi-Yauovog oblika koji smo tražili. Štoviše, Aspinwall je već gotovo bio dovršio svoj računalni program i očekivao je naš rezultat, koji bi bio ulazni podatak za njegov program. Jednog četvrtka navečer Morrison i ja napokon smo pouzdano mogli reći da smo odredili traženi Calabi-Yauov oblik. Taj rezultat zapravo je bio potprogram koji je zahtijevao svoj, prilično jednostavan računalni program. Program smo napisali do petka popodne, a kasno navečer imali smo rezultat.

Ali, bio je to petak, i to poslije pet sati popodne. Aspinwall je već bio otišao kući i ne bi se vratio do ponedjeljka. Bez njegovog programa nismo više ništa mogli. Ni ja ni Morri-

son nismo mogli zamisliti da čekamo cijeli vikend. Bili smo na rubu dugo očekivanog odgovora na pitanje o cijepanju tkiva svemira, i napetost je bila nepodnošljiva. I nazvali smo Aspinwalla. Isprva nije htio doći na posao sljedeće jutro kao što smo ga zamolili. No nakon mnogo zanovijetanja pristao je pridružiti nam se ako mu kupimo paket od šest piva. Pristali smo.

Trenutak istine

U subotu ujutro svi smo se sastali u Institutu. Bilo je to vedro, sunčano jutro u opuštenoj i šaljivoj atmosferi. Gotovo da sam očekivao da se Aspinwall neće ni pojaviti, a kad je ipak došao, petnaest minuta sam isticao koliko je važno što je prvi put došao u ured preko vikenda. On me je uvjeravao da će mu to biti i posljednji put.

Svi smo se okupili oko Morrisonovog računala u našem zajedničkom uredu. Aspinwall je rekao Morrisonu kako da učita njegov program i pokazao mu kako točno treba izgledati format ulaznih podataka. Morrison je u skladu s tim formatirao rezultate do kojih smo došli prethodne večeri i sve je bilo spremno.

Pojednostavljeno rečeno, radili smo na proračunu mase određene vrste čestica – specifičnom vibracijskom obrascu strune – kada se giba kroz univerzum čiju Calabi-Yauovu komponentu smo proučavali cijele te jeseni. U skladu s izloženom strategijom, nadali smo se da će se ta masa poklapati sa sličnim proračunom, obavljenim na Calabi-Yauovom obliku koji nastaje inverznim prijelazom s cijepanjem prostora. Taj drugi proračun bio je vrlo jednostavan i bili smo ga obavili nekoliko tjedana ranije; pokazalo se da rezultat iznosi 3, izražen osobitim jedinicama kojima smo se služili. Budući da smo sada izvodili numerički proračun pretpostavljenog zrcalnog odnosa, očekivali smo da neće-

pretpostavljenog zrcalnog odnosa, očekivali smo da ćemo mo dobiti baš 3, nego vrlo blizak broj, recimo 3,000001 ili 2,999999, a sićušna razlika objasnila bi se pogreškama pri zaokruživanju.

Morrison je sjedio za računalom i prst mu je lebdio nad tipkom "enter". Napetost je rasla sve dok nije rekao "Idemo" i pokrenuo proračun. Računalo je dalo rezultat već za nekoliko sekundi: 8,999999. Srce mi je stalo. Zar je moguće da invezni prijelazi s cijepanjem prostora remete zrcalni odnos, što bi vjerojatno značilo da se uistinu ne mogu događati? No odmah smo shvatili i da se tu krije nešto zanimljivo. Ako se fizike tih dvaju prostora doista ne poklapaju, onda je krajnje malo vjerojatno da računalni proračun da rezultat tako blizak cijelom broju. Ako su naše zamisli pogrešne, onda nema nikakva razloga očekivati išta osim kakva nasumičnog broja. Dobili smo pogrešan rezultat, ali on je mogao značiti da smo samo načinili kakvu jednostavnu aritmetičku grešku. Aspinwall i ja vratili smo se svojim bilješkama i

začas smo shvatili gdje smo pogriješili: u "jednostavnijem" proračunu od prije nekoliko tjedana ispustili smo množitelj 3; pravi rezultat iznosio je 9. Dakle, računalo je dalo upravo onaj rezultat koji nam je trebao.

Naravno, takvo naknadno poklapanje nije bilo jako uvjerljivo. Kad već znate koji odgovor želite, često je odveć lako dokučiti kako da ga dobijete. Zato nam je trebao još jedan primjer. Budući da smo već bili napisali potreban program, to nam nije bilo teško. Izračunali smo masu druge čestice za gornji Calabi-Yauov oblik, pazeći da ovaj put ne pogriješimo. Rezultat je glasio: 12. Ponovno smo se okupili oko računala i pokrenuli program. Nakon nekoliko sekundi pokazalo je rezultat: 11,999999. *Poklapanje*. Pokazali smo da pretpostavljeni zrcalni odnos doista jest zrcalni i stoga zrcalni prijelazi jesu dio fizike teorije struna.

Ja sam tada skočio sa stolca i otrčao neobuzdani pobjednički krug po uredu. Morrison je tiho uživao za računalom. No, Aspinwallova reakcija bila je znatno drukčija. "Baš li-

jepo, ali znao sam da će uspjeti", rekao je mirno. "I, gdje je moje pivo?"

Wittenov pristup

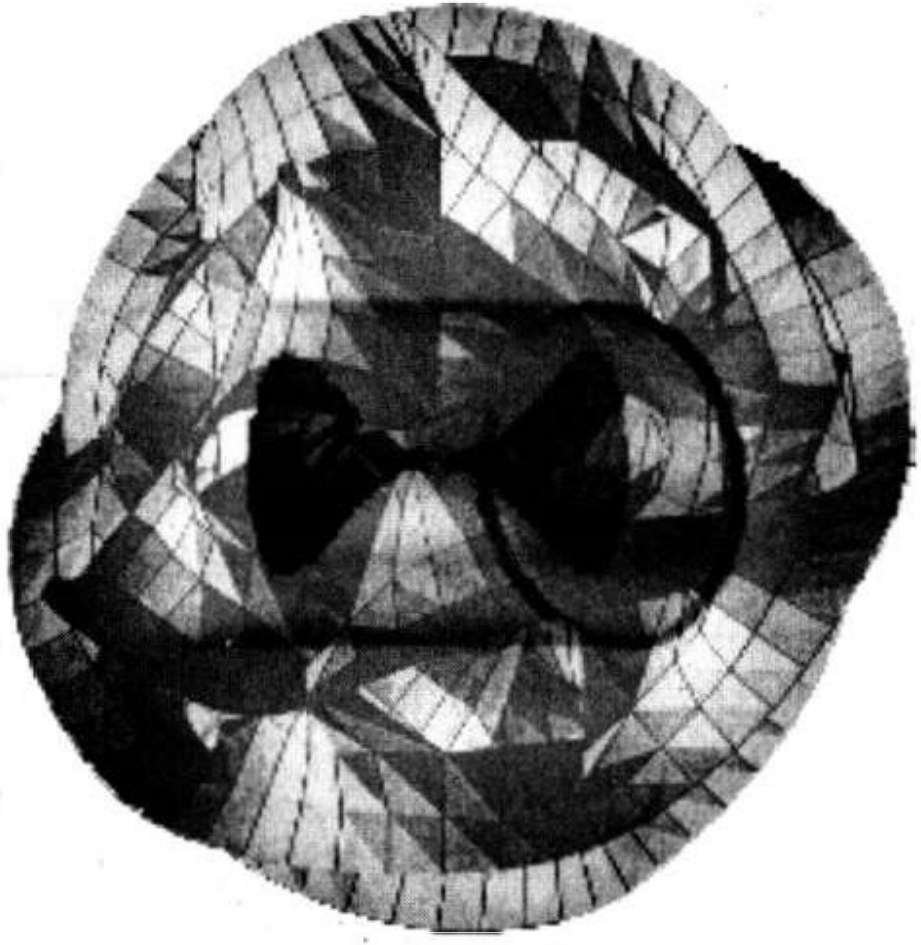
Već u ponedjeljak smo trijumfalno odmarširali Wittenu i rekli mu za svoj uspjeh. Bio je vrlo zadovoljan našim rezultatom. Pokazalo se da je i on bio upravo pronašao drugi način dokazivanja da se inverzni prijelazi mogu pojaviti u teoriji struna. Njegov argument bio je posve drukčiji od našega i služi kao dobra ilustracija zašto cijepanje prostora nema nikakve katastrofalne posljedice.

Njegov pristup ističe razliku između teorije točkastih čestica i teorije struna kad je riječ o takvim cijepanjima. Glavna razlika u tome je što u blizini procijepa postoje dvije vrste gibanja struna, ali samo jedna vrsta gibanja točkastih česti-

ca. Naime, struna se može gibati uz procijep, poput točkaste čestice, ali može i kružiti oko procijepa dok se giba prema naprijed, kao što je ilustrirano na slici 11.6. U biti, Wittenova analiza otkriva da strune koje kruže oko procijepa, što se ne može dogoditi u teoriji točkastih čestica, brane svemir oko sebe od katastrofalnih posljedica do kojih bi inače došlo. To je kao da svjetska površina strune – prisjetimo se iz poglavlja 6 da je to dvodimenzionalna površina koju opisuje struna dok se giba kroz prostor – pruža zaštitnu barijeru koja upravo poništava zloslutne aspekte geometrijske degeneracije tkiva prostora.

Mogli biste upitati: što ako do takvih cijepanja dođe kad u blizini ne bude struna da ga zaštite? Štoviše, možda se pitate i bi li vas u trenutku kad do njega dođe, struna – koja je beskonačno tanka petlja – zaštitila imalo bolje nego što bi vas obruč hula-hopa zaštitio od kasetne bombe. Odgovor na oba pitanja krije se u glavnom svojstvu kvantne mehanike o kojem smo raspravljali u poglavlju 4. Tamo smo vidjeli da se

u Feynmanovoj formulaciji kvantne mehanike predmet, bio



Slika 11.6 Svjetska površina koju opisuje struna stvara štit koji poništava potencijalno kataklizmičke posljedice povezane s cijepanjem tkiva prostora.

on čestica ili struna, giba od jedne do druge lokacije "njuškajući" sve moguće putanje. Gibanje koje tako nastaje kombinacija je *svih* mogućnosti, pri čemu matematika kvantne mehanike precizno određuje u kojoj mjeri svaka moguća putanja sudjeluje u njoj. Ako se pojavi procijep u tkivu prostora, onda među mogućim putanjama putujućih struna postoje i one koje okružuju procijep – putanje poput onih na slici 11.6. Čak i ako se čini da u trenutku kad procijep nastane oko njega nema nijedne strune, kvantna mehanika uzima u obzir fizikalne posljedice svih mogućih putanja struna, a među njima su i brojne (zapravo, bezbrojne) zaštitne putanje koje okružuju procijep. Witten je dokazao da ti prilozi precizno poništavaju kozmičku katastrofu koju bi procijep inače prouzročio.

U siječnju 1993. Witten i nas trojica istodobno smo objavili svoje radove u elektroničkom arhivu na internetu, u koji imaju pristup fizičari iz cijelog svijeta. U ta dva rada opisali smo, iz svojih različitih perspektiva, prve primjere prijelaza

s promjenom topologije – što je stručan naziv za procese cijepanja prostora koje smo otkrili. Tako je teorija struna kvantitativno razriješila pitanje može li se tkivo prostora pocijepati.

Posljedice

Saznanje da se cijepanje prostora može događati bez fizikalnih katastrofa mnogo nam je značilo. No što se onda *zapravo* događa kad se tkivo prostora pocijepa? Koje se posljedice uočavaju? Vidjeli smo da mnoga svojstva svijeta oko nas ovise o pojedinostima u strukturi uvijenih dimenzija. Dakle, pomislili biste da drastične preobrazbe jednog Calabi-Yauovog prostora u drugi, poput one na slici 11.5, imaju značajne fizikalne posljedice. No zapravo, u crtežima u nižim dimenzijama kojima vizualiziramo te prostore ta se

transformacija doima kompliciranijom nego što doista jest. Kad bismo mogli vizualizirati šestodimenzionalnu geometriju, vidjeli bismo da se prostor uistinu cijepa, ali na vrlo blag način. To je više nalik na moljca koji grize vunu nego na rupu u trapericama.

Naš i Wittenov rad dokazao je da fizikalna obilježja poput broja porodica vibracija struna i tipova čestica u svakoj porodici nisu pod utjecajem tih procesa. Kako se Calabi-Yauov prostor razvija cijepanjem, to utječe na precizne vrijednosti mase pojedinih čestica – ili energiju mogućih obrazaca vibracija struna. Naši radovi dokazali su da će te mase znatno varirati zbog promjenjivog geometrijskog oblika Calabi-Yauove komponente prostora: neke će se povećati, a druge smanjiti. No od najveće je važnosti činjenica da prilikom tog cijepanja ne dolazi ni do kakvih katastrofalnih skokova ni vršaka niti nastaju ikakva neobična svojstva. Sa stajališta fizike, trenutak cijepanja nema nikakvih razlikovnih obilježja.

Time se postavljaju dva pitanja. Prvo, usredotočili smo se na cijepanja prostornoga tkiva koja nastaju u dodatnoj, šestodimenzionalnoj komponenti svemira. Može li do takvih cijepanja doći i u poznatim nam, protežnim prostornim dimenzijama? Odgovor je gotovo sigurno pozitivan. Uostalom, prostor je prostor – bez obzira na to je li čvrsto uvijen u Calabi-Yauov oblik ili je razvijen u golemo prostranstvo svemira koje vidimo svake vedre, zvjezdane noći. Zapravo, već smo vidjeli da su i poznate nam prostorne dimenzije možda i same uvijene u divovski oblik koji se uvija sam u sebe, na drugoj strani svemira, te da je stoga čak i razlika između uvijenih i razvijenih dimenzija pomalo umjetna. Iako se naša i Wittenova analiza oslanjaju na posebna matematička svojstva Calabi-Yauovih oblika, rezultat – da se tkivo prostora može cijepati – zacijelo se može i šire primijeniti.

Drugo, može li već danas ili sutra doći do takvog cijepanja s promjenom topologije? Je li se ono moglo već dogoditi?

Odgovor je opet pozitivan. Mjerenja masa elementarnih čestica u eksperimentima pokazuju da su njihove vrijednosti prilično stabilne u vremenu. No ako se osvrnemo na najranija razdoblja, nakon samog velikog praska, čak i teoretičari koji se ne bave teorijom struna govore o važnim razdobljima u kojima su se mase čestica mijenjale s vremenom. Iz perspektive teorije struna, ta razdoblja su svakako mogla uključivati cijepanja s promjenom topologije o kojima raspravljamo u ovom poglavlju. Ako se približimo sadašnjem vremenu, opažena stabilnost masa elementarnih čestica implicira da, ako je svemir trenutačno podvrgnut cijepanju prostora s promjenom topologije, to se mora događati veoma polako – tako polako da je učinak toga na mase elementarnih čestica manji nego što to možemo izmjeriti u eksperimentima. Zanimljivo je da bi svemir mogao biti usred prostornog cijepanja, sve dok je taj uvjet zadovoljen. Ako bi se cijepanje odvijalo dovoljno polako, ne bismo ni znali da se događa. To je jedan od onih rijetkih primjera u fizici kad je nepostojanje neke uoč-

ljive pojave uzrok za veliku uzbuđenost. Nepostojanje opazivih katastrofalnih posljedica tako egzotičnog geometrijskog razvoja svjedoči o tome koliko je teorija struna nadmašila Einsteinova očekivanja.

DVANAESTO POGLAVLJE

Onkraj struna: u potrazi za M-teorijom

U svojoj dugotrajnoj potrazi za ujedinjenom teorijom Einstein je razmišljao o tome je li "Bog mogao načiniti svemir drukčije; naime, ostavlja li nužnost logičke jednostavnosti uopće ikakvu slobodu".[1] Tom primjedbom Einstein je izrazio gledište koje danas dijele mnogi fizičari: ako postoji ko-

načna teorija prirode, jedan od najuvjerljivijih argumenata u njenu korist glasio bi da ta teorija ni ne može biti drukčija. Konačna teorija morala bi imati oblik koji ima zato što je ona jedinstven eksplanatorni okvir, kadar opisati svemir bez ikakvih unutarnjih nedosljednosti i logičkih apsurda. Takva teorija objavila bi da su stvari kakve jesu jer *moraju* biti takve. A sva odstupanja, koliko god bila malena, vode prema teoriji koja – poput rečenice "Ova rečenica je laž" – sije sjeme vlastitog uništenja.

Kad bismo utvrdili takvu neizbježnost u strukturi svemira, prešli bismo velik dio puta prema rješenju nekih drevnih, dubokih pitanja. Ta pitanja ističu tajnu u vezi s tim tko ili što je načinilo naizgled nebrojene odabire koji su, kako se čini, bili potrebni kako bi naš svemir nastao. Neizbježnost odgovara na ta pitanja tako što briše opcije. Neizbježnost

---

[1] Albert Einstein, citiran u John D. Barrow, *Theories of Everything* (New York: Fawcett-Columbine, 1992), str. 13.

znači da izbor zapravo ne postoji. Neizbježnost objavljuje da svemir ne bi ni mogao biti drukčiji. Kao što ćemo vidjeti u poglavlju 14, ništa ne osigurava da je svemir tako čvrsto sazdan. No ipak, potraga za takvom čvrstoćom u zakonima prirode u srži je programa ujedinjenja u modernoj fizici.

Krajem 1980-ih fizičarima se činilo da, iako se teorija struna približila ostvarenju cilja – jedinstvenoj slici svemira – ipak nije u potpunosti uspjela u tome. Tome su bila dva razloga. Prvo, kao što smo spomenuli u poglavlju 7, fizičari su otkrili da zapravo postoji *pet* verzija teorije struna. Možda se sjećate da se zovu tip I, tip IIA, tip IIB, heterotička O(32) (ukratko, heterotička-O) i heterotička $E_8 x E_8$ (ukratko, heterotička-E). Sve one dijele mnoga osnovna obilježja – njihovi vibracijski obrasci određuju moguću masu i naboje sila, zahtijevaju ukupno 10 prostornovremenskih dimenzija, uvijene dimenzije moraju biti u nekom od Calabi-Yauovih oblika itd. – i zbog toga u prethodnim poglavljima nismo isticali njihove razlike. No ipak, analize 1980-ih pokazale su

da se one razlikuju. Više o njihovim svojstvima možete naći u bilješkama, ali dovoljno je znati da se razlikuju po tome kako uključuju supersimetriju, kao i po važnim pojedinostima vibracijskih obrazaca koje podupiru.[2] (Na primjer, te-

---

[2] Izrazimo ukratko razlike između pet teorija struna. Da bismo to učinili, napomenimo da se vibracijski poremećaji uzduž kružne strune mogu gibati u smjeru kazaljke na satu ili u suprotnom smjeru. Teorije struna tipa IIA i tipa IIB razlikuju se po tome što su u potonjoj teoriji ti smjerovi vibracija identični, a u prvoj su formalno posve suprotni. U tom kontekstu *suprotno* ima precizno matematičko značenje, ali najlakše je shvaćati kao u smislu smjerova rotacije rezultirajućih vibracijskih modela u jednoj i drugoj teoriji. U teoriji tipa IIB pokazuje se da se sve čestice vrte u istom smjeru (imaju istu kiralnost), dok u teoriji tipa IIA vrte se u oba smjera (imaju obje kiralnosti). No ipak, obje teorije uključuju supersimetriju. Dvije heterotičke teorije razlikuju se na sličan način, ali dramatičnije. Obje njihove vibracije u smjeru kazaljke nalikuju onima u teoriji tipa II (kad razmatramo samo vibracije u smjeru kazaljke, teorije tipa IIA i tipa IIB su iste), ali njihove vibracije u

orija struna tipa I ima otvorene strune s dva slobodna kraja, uz zatvorene petlje na koje smo se usredotočili.) To je bilo prilično neugodno za teoretičare struna, jer iako je vrlo lijepo kad imate ozbiljan prijedlog konačne, ujedinjene teorije, kad ih imate pet, svima im oduzimate vjetar u jedrima.

Drugo odstupanje od neizbježnosti nije tako očito. Da bismo ga u potpunosti razumjeli moramo znati da se sve fizikalne teorije sastoje od dva dijela. Prvi dio je zbirka osnovnih ideja teorije, koje su obično izražene matematičkim jednadžbama. Drugi dio teorije sastoji se od rješenja tih jednadžbi. Govoreći općenito, neke jednadžbe imaju jedno i samo jedno rješenje dok druge imaju više rješenja (možda i mnogo

---

smjeru suprotnom od kazaljke iste su kao u prvotnoj bozonskoj teoriji struna. Iako bozonska teorija struna ima nepremostive probleme kad razmatramo i vibracije u smjeru kazaljke i one u suprotnom smjeru, 1985. su David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec i Ryan Rohm (tada svi na sveučilištu Princeton, pod nadimkom "princetonski gudački kvartet") dokazali da savršeno razumna te-

orija nastaje ako se koristi u kombinaciji s teorijom tipa II. Doista čudno svojstvo te unije krije se u tome što se još od rada Richarda Browera s Bostonskog sveučilišta, Petera Godarda s Cambridgea i Charlesa Thorna sa sveučilišta Florida u Gainesvilleu zna da bozonska teorija struna zahtijeva 26-dimenzionalno prostorvrijeme, dok teorija superstruna, kao što smo rekli, zahtijeva 10-dimenzionalno. Stoga su heterotičke konstrukcije struna neobičan hibrid – *heteroza* – u kojemu vibracijski modeli u smjeru suprotnom kazaljki žive u 26 dimenzija, a modeli u smjeru kazaljke žive u 10 dimenzija! Prije nego što se zapletete pokušavajući naći smisla u tom zbunjujućem sklopu, Gross i suradnici dokazali su da se dodatnih 16 dimenzija na bozonskoj strani mora uviti u jedan od dva posebna višedimenzionalna oblika nalik na uštipak, što nam daje heterotičku-O i heterotičku-E teoriju. Budući da je dodatnih 16 dodatnih dimenzija na bozonskoj strani kruto uvijeno, svaka od tih teorija ponaša se kao da zapravo ima 10 dimenzija, kao u slučaju teorije tipa II. Opet, obje heterotičke teorije uključuju neku verziju supersimetrije. Na kraju, teorija tipa I blizak je rođak teorije tipa IIB osim što, uz zatvorene petlje struna koje smo raspravili u prethodnim poglavljima, ona ima i strune s nepovezanim krajevima – takozvanim *otvorenim strunama*.

više). (Jednostavan primjer: jednadžba "2 puta x jednako je 10" ima jedno rješenje: 5. Ali jednadžba "0 puta x jednako je 0" ima beskonačno mnogo rješenja. jer je 0 puta bilo koji broj jednako 0.) I tako, premda istraživanje vodi prema jedinstvenoj teoriji s jedinstvenim jednadžbama, može se dogoditi da ta neizbježnost bude kompromitirana jer jednadžbe imaju mnogo mogućih rješenja. Krajem 1980-ih činilo se da je to slučaj i s teorijom struna. Kad su fizičari proučili jednadžbe svih pet teorija struna, otkrili su da imaju mnogo rješenja – na primjer, mnogo različitih načina uvijanja dodatnih dimenzija – a svako rješenje odgovaralo je po jednom svemiru s različitim obilježjima. Iako su ti svemiri valjana rješenja jednadžbi teorije struna, čini se da većinom nemaju nikakve veze sa svijetom kakav poznajemo.

Moglo bi se činiti da su ta odstupanja od neizbježnosti prilično neugodne značajke teorije struna. No, istraživanja od sredine 1990-ih dala su nam novu nadu da su ta svojstva samo odraz načina na koji su teoretičari struna analizirali

teoriju. Ukratko, jednadžbe teorije struna tako su zamršene da nitko ne zna njihov točan oblik. Fizičari su uspjeli napisati samo približne verzije jednadžbi. Te približne jednadžbe znatno se razlikuju od jedne do druge teorije struna. I te približne jednadžbe, u kontekstu svake teorije struna, daju obilje rješenja, pravo blago neželjenih rješenja.

Od 1995. (početka druge revolucije superstruna) raste broj dokaza da bi precizne jednadžbe, čiji točan oblik nam je još nedostupan, mogle riješiti te probleme i tako pomoći teoriji struna da dobije auru neizbježnosti. Zapravo, već je ustanovljeno, na radost većine teoretičara struna, da će precizne jednadžbe dokazati da je svih pet teorija struna u bliskom srodstvu. Poput krakova morske zvijezde, one su dijelovi jednog, povezanog entiteta čija detaljna svojstva upravo intenzivno istražujemo. Umjesto da imaju pet različitih teorija struna, fizičari su sada uvjereni da postoji *jedna* teorija koja svih pet ušiva u jedinstven teorijski okvir. I

poput jasnoće koja nastaje kad se otkriju dotad nepoznati odnosi, to jedinstvo pruža novo, jako uporište za razumijevanje svemira prema teoriji struna.

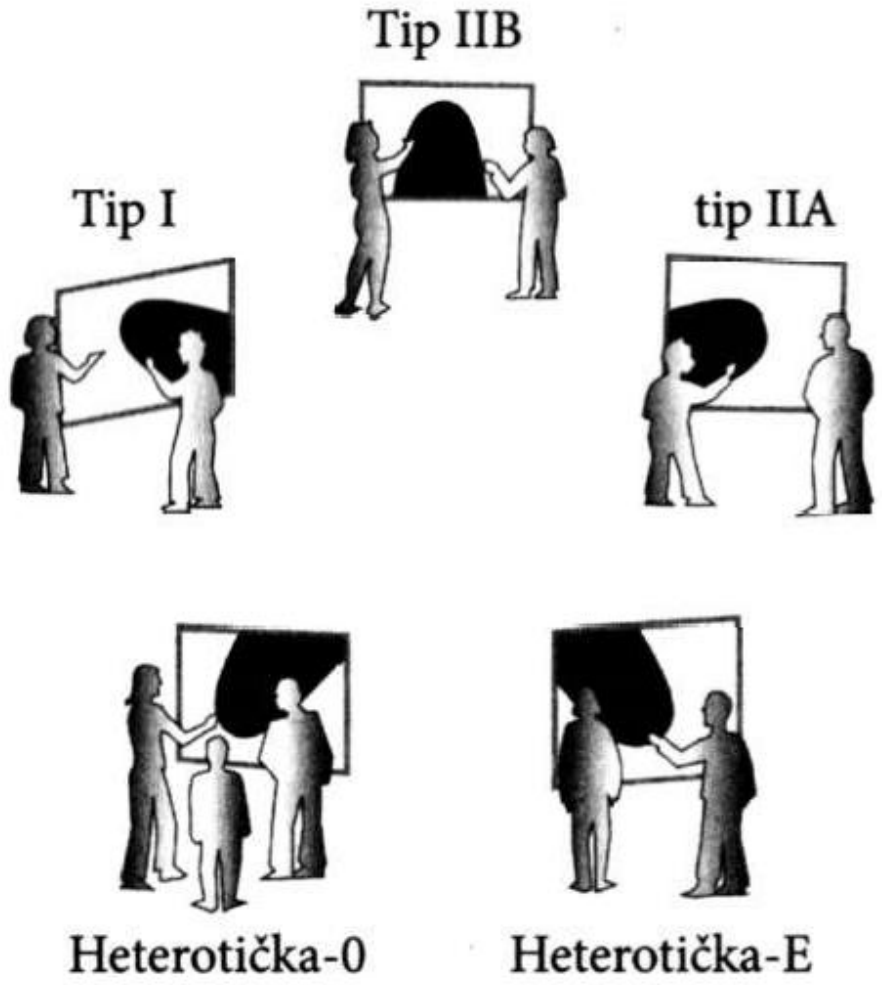
Da bismo objasnili ta opažanja, moramo se pozabaviti nekima od najtežih, najavangardnijih razvojnih procesa u teoriji struna. Moramo razumjeti prirodu aproksimacija koje se primjenjuje u teoriji struna, i njima svojstvena ograničenja. Moramo se barem donekle upoznati s domišljatim metodama – koje se kolektivno naziva *dualnostima* – koje fizičari primjenjuju kako bi zaobišli neke od tih aproksimacija. A tada ćemo morati pratiti zahtjevnu logiku koja se služi tim metodama kako bi otkrila važne spoznaje na koje aludiramo. No, ne zabrinjavajte se. Doista težak posao teoretičari struna već su obavili, a mi ćemo se ovdje zadovoljiti samo objašnjavanjem njihovih rezultata.

No ipak, budući da postoji tako mnogo posebnih tema koje moramo razviti i složiti u cjelinu, u ovom poglavlju bit će osobito teško izbjeći dojam da se od drveća ne vidi šuma.

Dakle, ako vam na bilo kojem mjestu o ovom poglavlju rasprava postane preteška i osjetite potrebu da je preskočite i posvetite se crnim rupama (poglavlje 13) ili kozmologiji (poglavlje 14), bacite pogled na sljedeći odjeljak, u kojem ukratko izlažemo ključne spoznaje druge revolucije superstruna.

Sažetak druge revolucije superstruna

Prva spoznaja druge revolucije superstruna izražena je slikama 12.1 i 12.2. Na slici 12.1 vidimo situaciju prije nego što smo dobili mogućnost da (djelomice) nadiđemo aproksimacijske metode kojima su fizičari analizirali teoriju struna. Vidimo da se smatralo da su pet teorija struna posve odvojene. No s novim spoznajama koje izviru iz nedavnih istraživanja, kao što vidimo na slici 12.2, vidimo da se svih

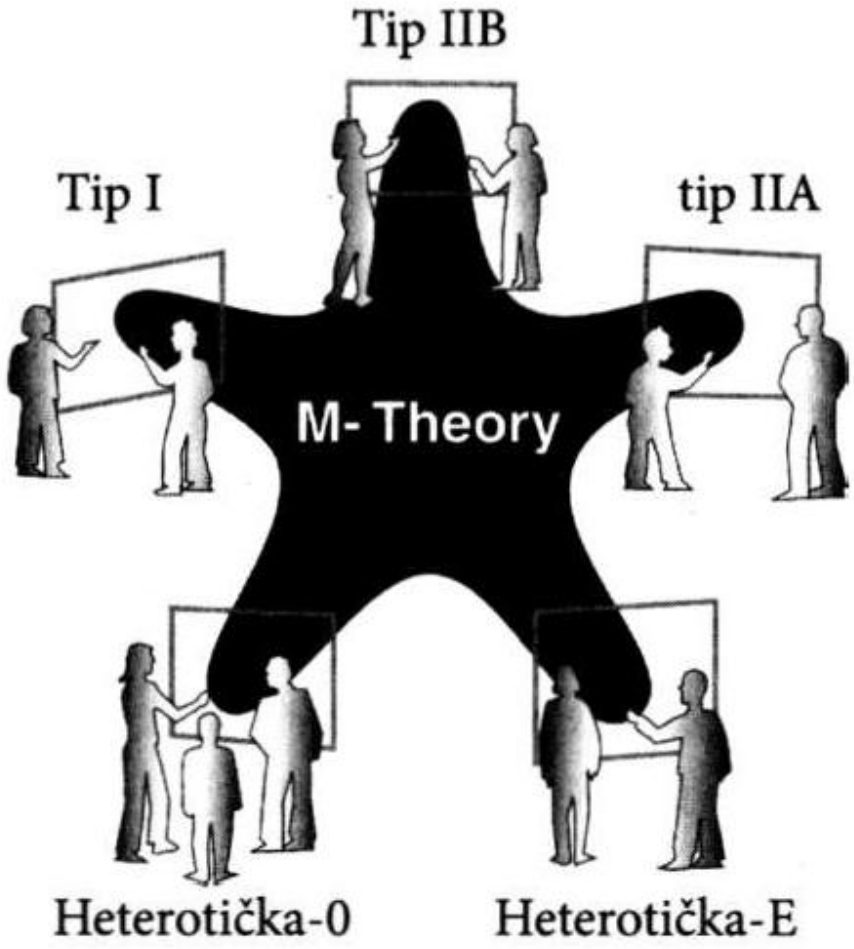


Slika 12.1 Fizičari koji su radili na pet teorija struna mislili su da rade na pet potpuno odvojenih teorija.

pet teorija struna, poput krakova morske zvijezde, danas vidi kao jedan, sveobuhvatan okvir. (Štoviše, na kraju ovog

poglavlja vidjet ćemo da će u taj savez ući čak i šesta teorija – šesti krak.) Taj sveobuhvatni okvir privremeno se naziva M-teorijom, iz razloga koji će uskoro postati jasni. Slika 12.2. predstavlja epohalni napredak u potrazi za konačnom teorijom. Naizgled nepovezane niti sada su utkane u istu tapiseriju – jedinstvenu, sveobuhvatnu teoriju koja bi lako mogla biti ona žuđena teorija svega.

Iako je još ostalo mnogo posla, fizičari su već otkrili dva bitna svojstva M-teorije. Prvo, M-teorija ima *jedanaest* dimenzija (deset prostornih i jednu vremensku). Donekle kao što je Kaluza otkrio da jedna dodatna prostorna dimenzija omogućuje neočekivano stapanje opće relativnosti i elektromagnetizma, tako su i teoretičari struna shvatili da jedna dodatna prostorna dimenzija u teoriji struna – osim devet prostornih i jedne vremenske dimenzije o kojima smo raspravljali u prethodnim poglavljima – omogućuje vrlo zadovoljavajuću sintezu svih pet verzija teorije. Štoviše, ta dodatna prostorna dimenzija nije isisana iz malog prsta;



Slika 12-2 Rezultati druge revolucije superstruna pokazali su da su svih pet teorija struna zapravo dio jednog jedinstvenog okvira, privremeno nazvanog M-teorija.

teoretičari struna shvatili su da je logika iz 1970-ih i 1980-ih koja je dovela do jedne vremenske i devet prostornih

dimenzija bila aproksimativna, i da precizni izračuni, koje je sada moguće obaviti, pokazuju da je jedna prostorna dimenzija dosad bila jednostavno izostavljena.

Drugo otkriveno svojstvo M-teorije glasi da ona sadrži titrajuće strune, ali i druge objekte: titrajuće dvodimenzionalne membrane, zatitrane trodimenzionalne kapljice (zvane "tro-brane"), i obilje drugih sastojaka. Kao i jedanaesta dimenzija, i to svojstvo M-teorije nastaje kad izračuni ne ovise o aproksimacijama kojima se pribjegavalo prije sredine 1990-ih.

Osim tih i mnogih drugih saznanja stečenih u proteklih nekoliko godina, istinska priroda M-teorije velikim dijelom ostaje misteriozna – što je jedno od mogućih značenja slova "M". Fizičari diljem svijeta marljivo rade kako bi stekli potpuno razumijevanje M-teorije – to bi mogao biti glavni problem fizike dvadesetprvog stoljeća.

Ograničenja metode kojom su se fizičari služili za analizu teorije struna vezana su uz nešto što se naziva računom smetnje. Račun smetnje je stručni naziv za aproksimacijski pokušaj da se dođe do približnog odgovora na pitanje i za sustavno poboljšavanje te aproksimacije uz razmatranje finijih detalja, koje se na početku zanemarivalo. Ona igra važnu ulogu na mnogim područjima znanstvenih istraživanja, važan je element u razumijevanju teorije struna i, kao što ćemo sada ilustrirati, na nju često nailazimo i u svakodnevnom životu.

Zamislite da vam se jednoga dana pokvari automobil. Odete mehaničaru da vam ga pogleda. Nakon brzog pregleda, mehaničar ima loše vijesti za vas. Potrebno je zamijeniti motor, što uz rad obično dođe oko 900 dolara. To je približna procjena i očekujete da će točan iznos biti poznat kad bude jasno koji će svi popravci biti potrebni. Nakon neko-

bude jasno koji će svi popravci biti potrebni. Nakon nekoliko dana, kad je stigao detaljnije pregledati automobil, mehaničar vam da precizniju procjenu: 950 dolara. Objašnjava da vam treba i nov regulator, koji uz ugradnju košta oko 50 dolara. Na kraju, kad dođete po auto, mehaničar vam zbroji sve zajedno i uruči vam račun od 987,93 dolara. Kaže da je tu uračunao 950 dolara za motor i regulator, 27 dolara za remen, 10 dolara za akumulatorski kabel i 93 centa za izolaciju. Prvotna procjena od 900 dolara dorađena je dodavanjem sve više pojedinosti. Fizikalno govoreći, te pojedinosti nazivaju se *smetnjama* prvotne procjene.

Kad se račun smetnji pravilno i djelotvorno primijeni, razlike između početne procjene i konačnog rješenja bit će u razumnim granicama. Kad dodate pojedinosti koje ste ignorirali u početnoj procjeni, one će unijeti tek neznatne promjene. No, kao što znamo, račun koji na kraju platimo ipak je bitno drukčiji od početne procjene. Iako bismo to mogli izraziti i s malo više osjećaja, takvu situaciju stručno

nazivamo neuspjehom računa smetnje. To znači da početna aproksimacija nije bila dobar vodič za konačno rješenje jer su "dorade", umjesto da unesu relativno malena odstupanja, dovele do velikih promjena aproksimacijskog rješenja.

Kao što smo ukratko naznačili u prethodnim poglavljima, u raspravi o teoriji struna dosad smo se oslanjali na pristup računa smetnji, donekle sličan onome kojim se služi i automehaničar. "Nepotpuno razumijevanje" teorije struna na koje se povremeno pozivamo potječe upravo od aproksimacijske metode, na ovaj ili onaj način. Počnimo sada od te važne napomene i raspravimo o računu smetnju u kontekstu koji je manje apstraktan od teorije struna, ali je bliži primjeni teorije struna nego što je to naš primjer s automehaničarom.

Klasičan primjer računa smetnji

Gibanje Zemlje kroz Sunčev sustav klasičan je primjer upotrebe pristupa računa smetnji. Kad je riječ o tako velikim udaljenostima dovoljno je uzeti u obzir samo gravitaciju, ali ako ne dodamo određene aproksimacije, dobivamo vrlo zamršene jednadžbe. Prisjetimo se da, i prema Newtonu i prema Einsteinu, sve utječe gravitacijskom silom na sve drugo, a to brzo dovodi do zamršenog i matematički neizračunljivog potezanja užeta između Zemlje, Sunca, Mjeseca, drugih planeta i, u načelu, svih ostalih nebeskih tijela uopće. Kao što možete zamisliti, nemoguće je uzeti u obzir sve te utjecaje i precizno odrediti gibanje Zemlje. Zapravo, čak i kad bi postajala samo tri takva nebeska putnika, jednadžbe bi bile tako kompliciranе da ih nitko ne može riješiti u cjelini.[3]

---

[3] Kad govorimo o "egzaktnim" odgovorima u ovom poglavlju, ono što doista mislimo je egzaktno predviđanje o nekoj fizikalnoj veličini *u nekom odabranom teorijskom okviru*. Sve dok ne budemo napokon imali konačnu teoriju – možda je već imamo, a možda je nikad nećemo imati – sve naše teorije i same će biti aproksima-

No ipak *možemo* vrlo precizno predvidjeti gibanje Zemlje kroz Sunčev sustav, i to služeći se pristupom računa smetnji. Zbog goleme Sunčeve mase u usporedbi sa svim ostalim članovima Sunčeva sustava i zbog njegove blizine Zemlji u usporedbi sa svim ostalim zvijezdama ono ima daleko najjači utjecaj na gibanje Zemlje. Zato možemo dobiti približnu procjenu razmatrajući samo gravitacijski utjecaj Sunca. Ona je i više nego prikladna za mnoge svrhe. Ako je nužno, tu aproksimaciju možemo doraditi redom uključujući gravitacijske učinke obližnjih relevantnih tijela, na primjer, Mjeseca i planeta koji su u blizini u danom trenutku. Izračuni postaju kompliciraniji kako se zamršuje mreža gravitacijskih utjecaja, ali nemojmo zato odbaciti filozofiju računa smetnji: gravitacijska interakcija između Sunca i Zemlje pruža nam aproksimacijsko objašnjenje Zemljina gibanja, a iz kompleksa ostalih gravitacijskih utjecaja izvodimo niz sve manjih dorada tog objašnjenja.

Pristup računa smetnji u tom primjeru funkcionira jer

postoji prevladavajući fizikalni utjecaj koji omogućava relativno jednostavan teorijski opis. To nije uvijek slučaj. Na primjer, ako nas zanima gibanje triju zvijezda usporedive mase koje orbitiraju jedna oko druge u trinarnom sustavu, onda ne može izdvojiti nijedan prevladavajući gravitacijski odnos čiji utjecaj bi učinio ostale manje važnima. Dakle, tu ne postoji jedna dominantna interakcija koja bi omogućila približnu procjenu, pri čemu bi drugi učinci služili samo za male dorade. Kad bismo pokušali primijeniti pristup računa smetnji i izdvojiti gravitacijsko privlačenje između dviju zvijezda kako bismo dobili približnu procjenu, ubrzo bismo vidjeli da je taj pristup jalov. Izračuni bi nam otkrili da "do-

---

cije stvarnosti. Ali taj pojam aproksimativnoga nema ništa s našom raspravom u ovom poglavlju. Ovdje nas zanima činjenica da je unutar odabrane teorije često teško, ako ne i nemoguće, izvesti egzaktna predviđanja koja teorija daje. Umjesto toga, takva predviđanja moramo izvesti služeći se aproksimacijskim metodama zasnovanima na perturbacijskom pristupu.

rada" previđenoga gibanja koju dobijemo kad uključimo i treću zvijezdu *nije* malena nego je usporediva s navodnom približnom procjenom. To nam je poznato: gibanje troje plesača koji plešu horu nije baš slično gibanju dvoje plesača koji izvode tango. Znatna dorada znači da je početna aproksimacija bila vrlo neprecizna i da je cijeli naš plan počivao na kuli od karata. Moramo napomenuti da ta dorada nije znatna samo zbog uključenja treće zvijezde. Tu dolazi i do domino-efekta: velika dorada jako utječe na gibanje drugih dviju zvijezda, što pak dodatno utječe na gibanje treće zvijezde, a to nadalje utječe na prve dvije, i tako dalje. U gravitacijskoj mreži sve su niti jednako važne i moramo ih razmatrati u istom trenutku. U takvim slučajevima često se možemo osloniti samo na to da će sirova snaga kompjutora uspjeti simulirati konačno gibanje.

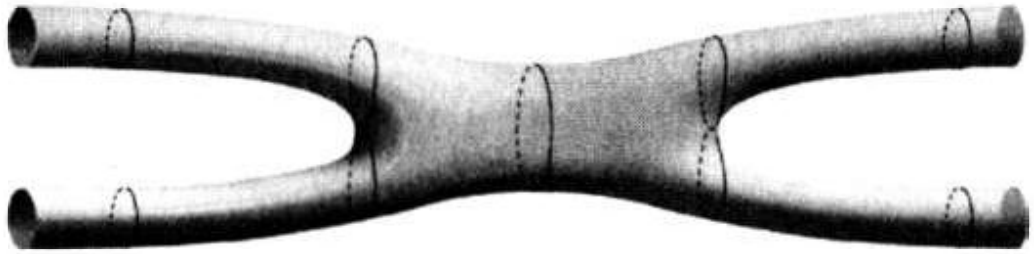
Taj primjer pokazuje nam koliko je u primjeni pristupa računa smetnji važno odrediti je li navodna približna procjena doista približna, a ako jest, koje pojedinosti i koliko

njih treba uključiti kako bismo ostvarili željenu razinu preciznosti. Kao što ćemo sada pokazati, ta pitanja posebno su važna za primjenu metoda računa smetnji na fizikalne procese u mikrosvijetu.

Pristup računa smetnji primijenjen na teoriju struna

Fizikalne procese u teoriji struna čine temeljne interakcije između titrajućih struna. Kao što smo rekli na kraju poglavlja 6,* među tim interakcijama je cijepanje i spajanje petlji struna, kao na slici 6.7, koju reproduciramo na slici 12.3 da ne morate listati. Teoretičari struna pokazali su kako se sa shematskim prikazom na slici 12.3 može povezati precizna matematička

* Čitateljima koji su preskočili odjeljak "Precizniji odgovor" u poglavlju 6 moglo bi pomoći ako prelete prvi dio tog odjeljka.



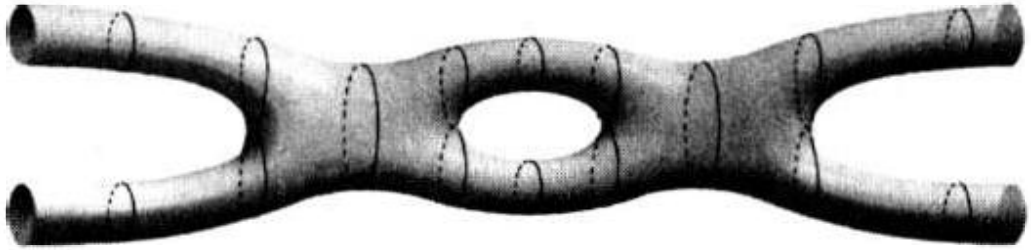
Slika 12.3 Strune u interakciji spajanjem i razdvajanjem.

formula – formula koja izražava utjecaj koji svaka dolazeća struna vrši na rezultirajuće gibanje druge strune. (Formula se u pojedinostima razlikuje u tih pet teorija, ali te detalje zasad ćemo ignorirati.) Kad ne bi bilo kvantne mehanike, ta formula značila bi kraj priče o tome kako strune stupaju u interakcije. Ali, mikroskopska grozničavost koju određuje načelo neodređenosti implicira da parovi struna/antistruna (dviju struna koje titraju suprotnim vibracijskim obrascima) mogu odjednom nastati, posudivši energiju od univerzuma, ako se dovoljno brzo međusobno anihiliraju i tako otplate taj energijski dug. Takvi parovi struna, koji se rađaju u kvantnoj

groznici, ali napajaju se posuđenom energijom, pa se moraju brzo rekombinirati u jednu petlju, poznati su kao *parovi virtualnih struna*. Iako je njihova prisutnost samo trenutačna, ona utječe na konkretna svojstva interakcije.

To je shematski prikazano na slici 12.4. Dvije početne strune sudare se na točki označenoj (a), gdje se stope u jednu petlju. Ta petlja prevali određeni put, ali na točki (b) grozničave kvantne fluktuacije prouzroče stvaranje para virtualnih struna koji se giba, ali se anihilira na točki (c) i opet stvori jednu strunu. Na kraju, na točki (d) ta struna preda svoju energiju rastočivši se na par struna koje kreću u novim smjerovima. Zbog toga što je u središtu slike 12.4 jedna petlja, fizičari to nazivaju "procesom jedne petlje". Kao i kod interakcije prikazane na slici 12.3, s tim dijagramom može se povezati precizna matematička formula koja sažima učinak para virtualnih čestica na gibanje dviju početnih struna.

Ali ni to nije kraj priče, jer kvantno podrhtavanje može prouzročiti da se izboji virtualnih struna pojavljuju u bilo



Slika 12.4 Kvantna groznica može prouzročiti da par struna/anti-struna nastane (b) i anihilira se (c), izvodeći zamršeniju interakciju.

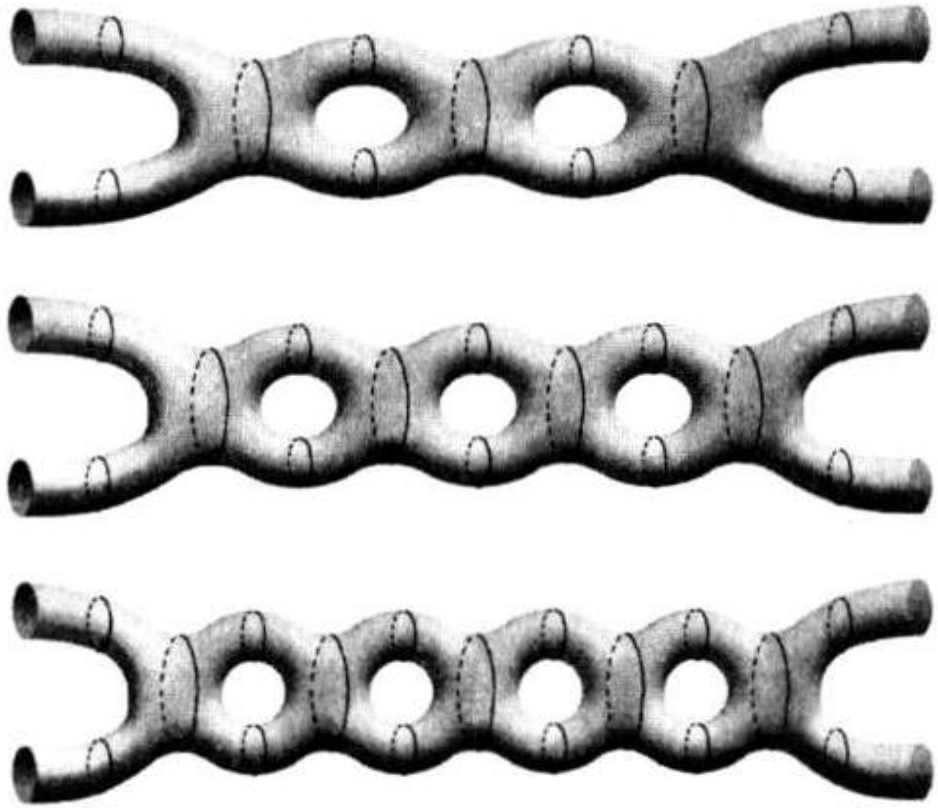
kojem broju, stvarajući niz parova virtualnih struna. Tako nastaju dijagrami sa sve više petlji, kao što je ilustrirano na slici 12.5. Svaki dijagram pruža lak i jednostavan način prikazivanja fizikalnih procesa koji se odvijaju: dolazeće strune se stapaju, kvantno podrhtavanje uzrokuje da se ishodna petlja razdvoji na par virtualnih struna, one se zajedno gibaju i potom se međusobno anihiliraju stapajući se u jednu petlju, koja se dalje giba i stvara drugi par virtualnih struna, i tako dalje. Kao i kod drugih dijagrama, za svaki od tih procesa postoji odgovarajuća matematička formula koja sumira učinak na gibanje prvotnog para struna.[4]

Štoviše, kao što je automehaničar odredio vaš konačni račun za popravak automobila dorađivanjem svoje prvotne procjene od 900 dolara dodavši joj 50 dolara, 27 dolara, 10 dolara i 93 centa, i kao što smo dolazili do sve preciznijeg razumijevanja gibanja Zemlje dodajući utjecaju Sunca sve manje učinke Mjeseca i drugih planeta, tako su teoretičari struna pokazali da interakciju između dviju struna možemo razumjeti dodajući matematičke izraze za dijagrame bez petlji (bez parova virtualnih struna), s jednom petljom (jednim parom virtualnih struna), s dvjema petljama (dva para virtualnih struna) i tako dalje, kao što je ilustrirano na slici 12.6.

Za precizan izračun potrebno je da zbrojimo matematičke izraze povezane sa svakim od tih dijagrama, sa sve većim brojem petlji. No budući da postoji beskonačno mnogo ta-

---

[4] Ti dijagrami su verzije takozvanih Feynmanovih dijagrama u teoriji struna, koje je Richard Feynman osmislio za izvođenje perturbacijskih izračuna u kvantnoj teoriji polja točkastih čestica.



Slika 12.5 Kvantna groznica može prouzročiti pojavu i anihilaciju brojnih nizova parova struna/antistruna.

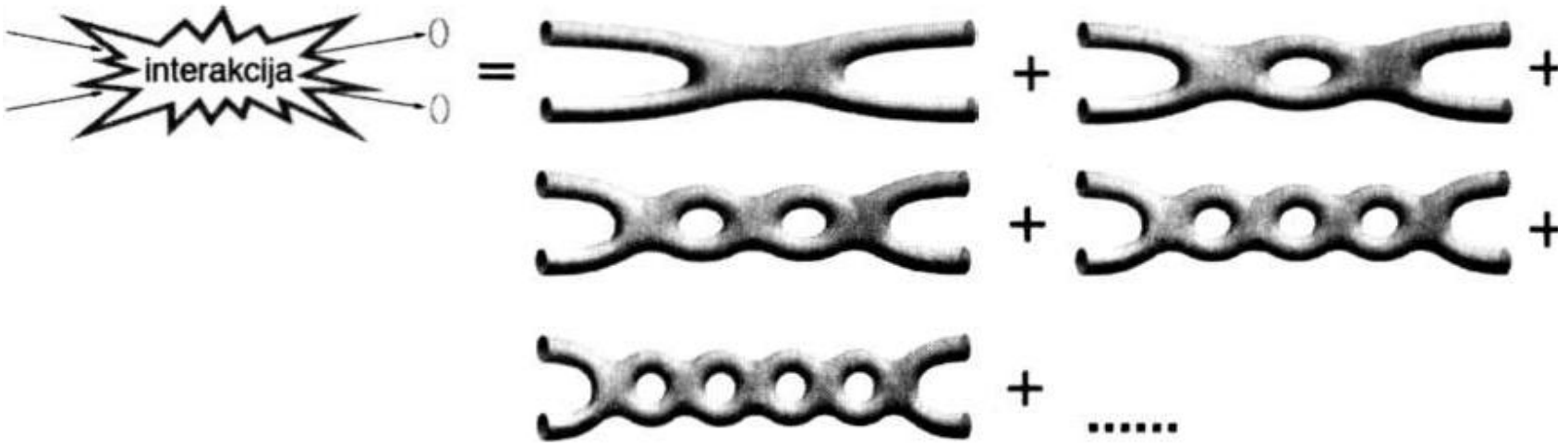
kvih dijagrama, a matematički izrazi povezani s njima postaju sve teži kako raste broj petlji, to nije moguće izvesti. Teoretičari struna su umjesto toga postavili te izračune u okvir računa smetnji, na temelju očekivanja da procesi bez petlji

pružaju razumno približnu procjenu, jer dijagrami s više petlji daju sve manje utjecaje kako se broj petlji povećava.

Zapravo, sve što znamo o teoriji struna – uključujući velik dio gradiva iz prethodnih poglavlja – fizičari su otkrili obavljajući naporne i zahtjevne izračune na temelju pristupa računa smetnji. No da bismo povjerovali da su rezultati točni, moramo odrediti jesu li navodno približno točne procjene koje zanemaruju sve osim prvih nekoliko dijagrama sa slike 12.6 doista približno točne. To nas dovodi do glavnog pitanja: jesu li naši rezultati doista približno točni?

Je li približno dovoljno približno?

Ovisi. Iako matematička formula povezana sa svakim dijagramom postaje vrlo zamršena kako se povećava broj petlji, teoretičari struna uvidjeli su jedno osnovno i bitno svojstvo. Donekle slično tome kako jačina užeta određuje vjerojat-



Slika 12.6 Ukupan utjecaj koji svaka dolazeća struna ima na druge proizlazi iz zbrajanja utjecaja, uključujući dijagrame sa sve više petlji.

nost da će puknuti zbog snažnog povlačenja i drmanja, postoji broj koji određuje da će kvantne fluktuacije prouzročiti da se jedna struna raskoli na dvije, čime trenutno nastaje virtualni par. Taj broj poznat je kao *konstanta vezanja* struna (preciznije rečeno, svaka od pet teorija struna ima svoju vlastitu konstantu vezanja, o čemu ćemo uskoro nešto detaljnije). Taj naziv govori sam za sebe: veličina konstante vezanja struna opisuje koliko jako su kvantne fluktuacije

triju struna (početne petlje i dviju virtualnih petlji u koje se ona raskoli) međusobno povezane – kojom snagom su *vezane*, da se tako izrazimo. Izračuni na temelju formula pokazuju da, što je konstanta vezanja veća, to je vjerojatnije da će kvantne fluktuacije prouzročiti raspad početne strune (i kasnije ponovno spajanje); što je ta konstanta manja, to je manje vjerojatno da će takve virtualne strune na trenutak postojati.

Uskoro ćemo razmotriti pitanje određivanja vrijednosti konstante u svih pet teorija struna, ali prije toga, što zapravo podrazumijevamo pod "malenim" i "velikim" kad ocjenjujemo njenu veličinu? Pa, matematika u osnovi teorije struna pokazuje da je razdjelnica između "malenog" i "velikog" broj 1, i to u sljedećem smislu. Ako konstanta vezanja ima vrijednost manju od 1, onda – poput višestrukog udara munje – nije vjerojatno da će na trenutak nastati veći broj parova virtualnih struna. Ako je konstanta vezanja 1 ili

veća, sve je vjerojatnije da će na trenutak nastajati sve veći brojevi takvih virtualnih parova.[5] Ishod toga je sljedeće: ako je konstanta vezanja manja od 1, doprinos petlji dijagramu postaje sve manji kako se broj petlji povećava. Upravo je to potrebno za okvir računa smetnji, jer to naznačuje da ćemo dobiti razumno precizne rezultate čak i ako zanemarimo sve procese osim onih sa samo nekoliko petlji. Ali ako konstanta vezanja nije manja od 1, doprinos petlji dijagramu postaje sve važniji kako se povećava broj petlji. Kao i u slučaju trinarnog zvjezdanog sustava, pristup računa smetnji tada postaje neprikladan. Navodna aproksimacija – proces bez petlji – više uopće *nije* aproksimacija. (Ova rasprava vrijedi za svih pet teorija struna – pri čemu vrijednost konstante vezanja u svakoj teoriji određuje djelotvornost sheme aproksimacije u računu smetnji.)

To saznanje vodi nas do sljedećeg važnog pitanja: koja je vrijednost konstante vezanja (preciznije rečeno, koje su vrijednosti konstanti vezanja u svakoj od pet teorija struna)?

jednosti konstanti vezanja u svakoj od pet teorija struna)? *Zasad nitko nije uspio odgovoriti na to pitanje.* To je jedno od najvažnijih neriješenih pitanja u teoriji struna. Možemo biti sigurno da su zaključci koji se temelje na računu smetnji opravdani samo ako je konstanta vezanja manja od 1. Štoviše, precizna vrijednost konstante interakcije struna izravno utječe na masu i naboj raznih vibracijskih obrazaca struna. Dakle, vidimo da velik dio fizikalnih jednadžbi ovisi o vrijednosti konstante vezanja. Zato pobliže pogledajmo zašto važno pitanje njezine vrijednosti ostaje neodgovoreno – u svih pet teorija.

---

[5] Preciznije rečeno, svaki par virtualnih struna, to jest svaka petlja u danom dijagramu, pridonosi – među drugim, kompliciranijim izrazima –faktoru koji se množi s konstantom vezanja struna. Više struna znači više faktora za konstantu vezanja struna. Ako je konstanta interakcije struna manja od 1, ponavljana množenja još više smanjuju njen opći prilog; ako je ona 1 ili veća od 1, ponavljana množenja daju doprinos iste ili veće veličine.

Pristup određivanju kako strune uzajamno djeluju temeljen na računa smetnji može poslužiti i da se odrede fundamentalne jednadžbe teorije struna. U biti, jednadžbe teorije struna određuju uzajamno djelovanje struna, i obratno, međudjelovanje struna stupaju određuje jednadžbe teorije.

Kao glavni primjer, u svakoj od pet teorija struna postoji jednadžba koja određuje vrijednost konstante vezanja u toj teoriji. No fizičari zasad uspijevaju pronaći samo aproksimacije toj jednadžbi za svaku od tih teorija, matematički obrađujući malen broj relevantnih dijagrama struna, primjenjujući pristup računa smetnji. Evo što kažu aproksimativne jednadžbe: u svakoj od pet teorija struna, konstanta interakcije poprima vrijednost koja se množi s nulom, i rezultat je nula. Ta nas jednadžba, naravno, uopće ne zadovoljava. Budući da svaki broj pomnožen s nulom daje nulu, ta se jednadžba može riješiti bilo kojom vrijednošću konstante

vezanja. Dakle, aproksimativne jednadžbe ni u jednoj od pet teorija struna ne daju nam nikakve informacije o konstanti vezanja.

Kad smo već kod toga, u svih pet teorija struna postoji još jedna jednadžba, koja bi trebala precizno odrediti oblik i protežnih i uvijenih prostornovremenskih dimenzija. Aproksimativna verzija jednadžbe koju zasad imamo mnogo je stroža od one koja se odnosi na konstantu vezanja, ali i ona dopušta više rješenja. Na primjer, četiri protežne prostornovremenske sa svakim uvijenim, šestodimenzionalnim Calabi-Yauovim prostorom daju cijelu klasu rješenja, ali čak ni to ne iscrpljuje sve mogućnosti, među kojima je čak i posve drukčija raspodjela broja protežnih i uvijenih dimenzija.[6]

---

[6] Matematički obrazovanom čitatelju napominjemo da jednadžba navodi da se prostorvrijeme pokorava Riccijevoj ravnoj metrici. Ako podijelimo prostorvrijeme na kartezijski umnožak četverodi-

I, što ćemo sad s tim rezultatima? Tri su mogućnosti. Prvo, da počnemo od pesimistične mogućnosti: iako svaka teorija struna ima jednadžbe koje određuju vrijednost njezine konstante vezanja, kao i dimenzija i preciznog geometrijskog oblika prostorvremena – a time se ne može pohvaliti nijedna druga teorija – još nepoznat, precizan oblik tih jednadžbi ipak bi dopustio širok raspon rješenja i tako znatno oslabio njihovu moć predviđanja. Ako se pokaže da je ta mogućnost istinita, to bi bio jak udarac, jer teorija struna obećava da će moći *objasniti* ta svojstva svemira i neće zahtijevati da ih odredimo empirijskim promatranjima i umetnemo ih u teoriju na manje ili više proizvoljan način. Toj mogućnosti vratit ćemo se u poglavlju 15. Drugo, neželjena fleksibilnost aproksimacijskih jednadžbi struna možda otkriva skrivenu grešku u našem razmišljanju. Pokušavamo pristupom računa smetnji doći do vrijednosti same konstante vezanja struna. No, kao što smo objasnili, metode računa smetnji imaju smisla samo ako je konstanta vezanja manja od 1, i stoga naši

izračuni možda neopravdano prejudiciraju svoje rješenje – naime, da će rezultat biti manji od 1. Naš neuspjeh mogao bi značiti da je ta pretpostavka pogrešna i da je vezivanje u nekoj od pet teorija struna veće od 1. Treće, neželjena fleksibilnost možda je posljedica toga što se služimo približnim, a ne egzaktnim jednadžbama. Na primjer, iako konstanta vezanja u danoj teoriji struna može biti manja od 1, jednadžbe teorije ipak mogu ovisiti o doprinosu *svih* dijagrama. Naime, zbrojeni mali utjecaji dijagrama koji sadrže još više petlji mogli bi pretvoriti aproksimacijske jednadžbe – koje dopuštaju mnogo rješenja – u egzaktne jednadžbe, koje su mnogo strože.

Početkom 1990-ih godina većina teoretičara struna shvatila je da se zbog posljednjih dviju mogućnosti ne mogu u

---

menzionalnog Minkowskijevog prostorvremena i šesterodimenzionalnog kompaktnog Kählerovog prostora. Riccijeva ravna metrika je ekvivalentna potonjem kao Calabi-Yauovoj mnogostrukosti. Zato Calabi-Yauovi prostori imaju tako važnu ulogu u teoriji struna.

potpunosti osloniti na okvir računa smetnji. Gotovo svi su se složili da će se sljedeće otkriće sastojati u pristupu izvan računa smetnji – pristupu koji ne sputavaju aproksimacijske metode računanja i stoga bi mogao nadići ograničenja okvira računa smetnji. Još 1994. se pronalazak takvog sredstva doimao poput običnog sanjarenja. No sanjarenje se katkad pretvori u stvarnost.

Dvojnost

Stotine teoretičara struna diljem svijeta okupljaju se svake godine na konferenciji posvećenoj rezimiranju prošlogodišnjih rezultata i ocjenjivanju relativnih vrijednosti raznih mogućih smjerova istraživanja. Ovisno o napretku postignutom te godine može se predvidjeti koliko će sudionici biti zainteresirani i uzbuđeni. Sredinom 1980-ih, u vrijeme prve revolucije superstruna, konferencije su bile prožete

nesputanom euforijom. Fizičari su se nadali da će uskoro u potpunosti razumjeti teoriju struna i otkriti da je ona konačna teorija svemira. Osvrnemo li se sad na to, vidjet ćemo da je to bilo naivno. U međuvremenu se pokazalo da postoje mnogi duboki i istančani aspekti teorije struna koji će nedvojbeno zahtijevati dugotrajno i predano istraživanje. Nakon prvih, nerealističnih očekivanja uslijedio je zastoj; nije sve odmah sjelo na svoje mjesto i mnogi istraživači bili su smoždeni. Konferencije o teoriji struna krajem 1980-ih odražavale su svojevrsnu razočaranost niskog intenziteta – fizičari su predstavljali zanimljive rezultate, ali ozračje više nije bilo nadahnuto. Neki su čak predlagali da zajednica teoretičara struna prestane održavati godišnje skupove. No, početkom 1990-ih zamah se počeo vraćati. Raznim otkrićima, od kojih smo neka raspravili u prethodnim poglavljima, teorija struna se obnavljala i istraživači su opet bili prožeti uzbuđenjem i optimizmom. Ali ništa nije upućivalo na ono

što će se dogoditi na konferenciji u ožujku 1995. na University of Southern California.

Kad je došao red na njega, Edward Witten pohitao je za katedru i održao predavanje koje je potaknulo drugu revoluciju superstruna. Nadahnut radovima Duffa, Hulla, Townsenda, i oslanjajući se na saznanja Schwarza, indijskog fizičara Ashoke Sena i drugih, Witten je najavio strategiju za nadilaženje razumijevanja teorije struna prema računu smetnji. Srž tog plana sadrži pojam *dvojnosti*.

Fizičari se služe pojmom dvojnosti kako bi opisali teorijske modele koji se naizgled razlikuju ali ipak se pokazalo da opisuju iste fizikalne zakone. Postoje "trivijalni" primjeri dvojnosti u kojima su navodno različite teorije zapravo identične, a čini se da su različite samo zbog načina na koji ih se predstavlja. Onaj tko govori samo engleski ne bi prepoznao teoriju relativnosti kao Einsteinovu teoriju kad bi je vidio na kineskom. No, fizičar koji zna oba jezika lako bi je preveo i ustanovio da su jednake. Taj primjer naziva-

mo "trivijalnim" jer se takvim prijevodom ne dobiva ništa sa stajališta fizike. Kad bi netko tko zna i engleski i kineski proučavao kakav težak problem na području opće relativnosti, bilo bi mu jednako teško bez obzira na jezik kojim bi ga izrazio. Prijelaz s engleskog na kineski, ili obratno, ne bi donio nikakve fizikalne spoznaje.

Netrivijalni primjeri dvojnosti su oni u kojima različiti opisi iste fizikalne situacije pružaju različite i komplementarne fizikalne spoznaje i matematičke metode analize. Zapravo, već smo naišli na dva primjera dvojnosti. U poglavlju 10 raspravljali smo o tome kako se teorija struna u svemiru koji ima kružnu dimenziju polumjera R može jednako dobro opisati kao svemir s kružnom dimenzijom polumjera $1/R$. To su različite geometrijske situacije koje su, zbog svojstava teorije struna, zapravo fizikalno identične. Drugi primjer je zrcalna simetrija. Tu dva različita Calabi-Yauova prostora s dodatnih šest prostornih dimenzija – svemira

koji bi se na prvi pogled doimali posve drukčijima – daju jednaka fizikalna svojstva. Pružaju dvojne opise istog svemira. Što je najvažnije, za razliku od usporedbe engleskog i kineskog, postoje važna fizikalna saznanja koja slijede iz tog dvojnog opisa, na primjer, minimalna veličina kružnih dimenzija i procesi koji mijenjaju topologiju u teoriji struna.

U svom predavanju na konferenciji o strunama 1995. Witten je iznio dokaze o novoj vrsti dubinske dvojnosti. Kao što smo ukratko iznijeli na početku ovog poglavlja, ustvrdio je da su pet teorija struna, premda se naizgled razlikuju u svojoj osnovnoj konstrukciji, zapravo samo različiti načini opisivanja istih fizikalnih osnova. Dakle, umjesto da imamo pet različitih teorija struna, jednostavno ćemo imati pet različitih prozora kroz koje ćemo promatrati jedan jedini teorijski okvir.

Prije otkrića 1990-ih, neki fizičari samo su priželjkivali mogućnost tako obuhvatne verzije dvojnosti, ali o njoj su govorili rijetko, ili su šutjeli, jer je bila tako neobična. Ako se

dvije teorije struna u osnovi razlikuju u važnim pojedinostima, teško je zamisliti kako bi one mogle biti tek različiti opisi istih fizikalnih zakona. No ipak, u istančanostima teorije struna skrivaju se dokazi da svaka od pet teorija struna *jest* dvojna. Štoviše, kao što ćemo vidjeti, Witten je dao dokaze da im se pridružuje čak i šesta teorija.

Ti procesi blisko su povezani s pitanjima primjenjivosti metoda računa smetnji koje smo upoznali na kraju prethodnog odjeljka. Razlog je to što se pet teorija struna znatno razlikuju kad je riječ o slabom vezanju *slabom vezanju* – što je stručan izraz koji znači da je konstanta vezanja struna manja od 1. Zbog toga što su se oslanjali na metode računa smetnji, fizičari neko vrijeme nisu uspijevali razmotriti pitanje koja bi svojstva imala svaka od teorija kad bi njezina konstanta vezanja bila veća od 1 – što je takozvano *jako vezanje*. Witten i drugi, kao što ćemo sada vidjeti, tvrde da sad možemo odgovoriti na to važno pitanje. Njihovi rezul-

tati uvjerljivo dokazuju da, zajedno sa šestom teorijom koju ćemo opisati, jako vezanje u svakoj od tih teorija ima dvojni opis s obzirom na slabo vezanje u drugoj, i obratno.

Da bismo dobili opipljiv dojam o tome što to znači, razmotrimo sljedeću analogiju. Zamislimo dvije osobe koje baš i ne izlaze mnogo u vanjski svijet. Jedna voli led, ali začudo nikad nije vidjela vodu (u tekućem stanju). Druga voli vodu, ali nekim čudom nikad nije vidjela led. One se slučajno sretnu i odluče poći na logorovanje u pustinji. Nakon polaska, dive se opremi koju je ponio onaj drugi. Ljubitelj leda netremice zuri u prozirnu, glatku tekućinu ljubitelja vode, a ljubitelj vode ne može se dovoljno načuditi čvrstim kristalnim kockama ljubitelja leda. Nijedan od njih nema pojma da postoji duboka povezanost između vode i leda; za njih su to u potpunosti različite tvari. Ali, zašavši u vruću pustinju, s velikim iznenađenjem gledaju kako se led polako počinje pretvarati u vodu. A u hladnoj pustinjskoj noći s ne manjim čuđenjem promatraju kako se tekuća voda polako počinje

pretvarati u kruti led. Shvaćaju da te dvije tvari – koje su prije smatrali posve nepovezanima – zapravo blisko povezane.

Dvojnost u pet teorija struna donekle je slična: pojednostavljeno govoreći, konstante vezanja struna analogne su temperaturi u našoj pustinjskoj analogiji. Poput leda i vode, svake dvije od pet teorija struna na prvi su pogled posve različite. No ako variramo njihove konstante vezanja, one se pretvaraju jedna u drugu. Kao što se led pretvara u vodu kako povećavamo temperaturu, jedna teorija struna može se pretvoriti u drugu kako joj povećavamo konstantu interakcije. To je velik korak prema saznanju da su sve teorije struna dvojni opisi jedne jedine osnovne strukture – kao što je H_2O osnovna struktura i vode i leda.

Logika tih rezultata gotovo u potpunosti se oslanja na argumente koji su u temeljima načela simetrije. Pogledajmo ih.

Godinama nitko nije ni pokušavao proučavati svojstva neke od teorija struna uz velike vrijednosti konstante vezanja jer nitko nije imao pojma kako bi nastavio bez računa smetnji. No, krajem 1980-ih i početkom 1990-ih godina fizičari su polako ali ustrajno napredovali u određivanju nekih posebnih svojstava – uključujući neke mase i naboje sila – koja pripadaju fizici jakog vezivanja u danoj teoriji struna, a još su unutar naših računskih sposobnosti. Izračun tih svojstava, koji nužno nadilazi okvir računa smetnji, imao je glavnu ulogu u napretku druge revolucije superstruna i čvrsto je utemeljen na moći simetrije.

Načela simetrije korisna su sredstva za razumijevanje mnogo toga o fizikalnom svijetu. Na primjer, raspravili smo o tome kako nam dobro utemeljeno uvjerenje da za zakone fizike nijedno mjesto ni vrijeme nisu ni u kojem smislu posebni omogućuje da ustvrdimo kako su zakoni koji vla-

daju sada i ovdje isti kao i oni koji vladaju posvuda i bilo kada. To je pompozan primjer, ali načela simetrije mogu biti jednako važna i u ne tako sveobuhvatnim okolnostima. Na primjer, ako ste svjedočili nekom zločinu ali ste uspjeli vidjeti samo desnu stranu počiniteljeva lica, policijski crtač će iskoristiti vaše informacije da nacrta cijelo lice. Razlog tome je simetrija. Iako postoje razlike između lijeve i desne strane nečijeg lica, ona su većinom dovoljno simetrična da se jedna strana lica može "prebaciti" na drugu stranu kako bi se dobila njezina dobra aproksimacija.

U svim tim, veoma različitim primjenama, moć simetrije je njena sposobnost da odredi svojstva *neizravno* – a to je često mnogo lakše od izravnog pristupa. O fundamentalnim zakonima fizike u galaksiji Andromeda mogli bismo nešto doznati tako da otputujemo onamo, pronađemo planet u orbiti oko neke zvijezde, izgradimo ciklotrone i izvedemo eksperimente koje izvodimo i na Zemlji. Ali, neizravan

pristup, s pozivanjem na simetriju bez obzira na promjenu mjesta, daleko je lakši. Isto tako, o obilježjima počinitelja lica mogli bismo štošta doznati tako da ga uhvatimo i pogledamo. No često je mnogo lakše osloniti se na simetriju lijeve i desne strane lica.[7]

Supersimetrija je apstraktnije načelo simetrije koje se odnosi na fizikalna svojstva elementarnih sastojaka koji nose razne količine spina. U najboljem slučaju, rezultati eksperimenata daju samo naznake da mikrosvijet sadrži tu simetriju, ali iz već iznesenih razloga vlada jako uvjerenje da je doista sadrži. Kako god bilo, ona je integralan dio teorije struna. U 1990-ima, pod utjecajem revolucionarnog rada Nathana Sieberga s Institute for Advanced Study, fizičari su shvatili da je supersimetrija oštra i prodorna alatka koja neizravno može pružiti odgovore na neka vrlo teška i važna pitanja.

I bez razumijevanja zamršenih pojedinosti kakve teorije, činjenica da ona ima "ugrađenu" supersimetriju omogućava nam da postavimo važna ograničenja svojstvima koja bi ona

nam da postavimo važna ograničenja svojstvima koja bi ona mogla imati. služeći je jezičnom analogijom, zamislimo da znamo da je na listu papira napisan niz slova i da se u tom nizu slovo "y" pojavljuje točno tri puta, i da je taj papir skriven u zatvorenoj omotnici. Ako nemamo nikakvih dodatnih informacija, nikako ne možemo pogoditi kako glasi taj niz – to bi mogao biti i posve nasumičan sklop slova s tri ipsilona, poput *mvcfojziyxidqzyycdi*, ili bilo koja od beskonačno mnogo drugih mogućnosti. No zamislimo da smo dobili još dva ključa: skriveni niz slova zapravo je riječ na engleskom jeziku i ima minimalan broj slova od svih riječi koje sadrži tri ipsilona. Od beskonačnog broja niza slova koji smo imali na početku, ti ključevi smanjuju broj mogućnosti na samo *jednu* riječ – najkraću englesku riječ koja sadrži tri ipsilona: *syzygy*.

---

7 Naravno, ništa nam ne jamči da su ti neizravni pristupi opravdani. Na primjer, kao što neka lica nisu simetrična u smislu lijevo-desno, *moglo* bi biti da su zakoni fizike drukčiji u dalekim svemirskim prostorima, o čemu ćemo kratko raspraviti u poglavlju 14.

Supersimetrija nam pruža slične ključeve koji ograničavaju one teorije koje sadrže njezina načela simetrije. Da bismo stekli dojam o tome, zamislimo da smo dobili fizikalnu zagonetku analognu upravo opisanoj jezičnoj zagonetki. U kutiji je skriveno nešto – njegov identitet nije određen – što ima određeni naboj sile. Naboj može biti električni, magnetski ili bilo kakav, ali konkretno znamo samo da ima tri jedinice električnog naboja. Bez dodatnih informacija ne može se odrediti identitet sadržaja kutije. To bi mogle biti tri čestice naboja -1 (poput elektrona), jer ta kombinacija ima ukupan naboj tri; to bi moglo biti devet čestica s nabojem od jedne trećine (poput gornjeg kvarka), ili istih devet čestica s bilo kojim brojem čestica bez naboja (kao što su fotoni). Kao što je bio slučaj i sa skrivenim nizom slova kad smo imali samo ključ o tri ipsilona, mogućnosti sadržaja kutije su beskonačne.

No sada zamislimo da, kao u slučaju s jezičnom zagonetkom, dobijemo dva dodatna ključa: teorija koja opisuje svijet – a stoga i sadržaj kutije – supersimetrična je, a sadr-

žaj kutije ima minimalnu masu koja zadovoljava prvi ključ, o tri jedinice naboja. Na temelju saznanja E. Bogomoljnog, Manoja Prasada i Charlesa Sommerfielda, fizičari su dokazali da ta specifikacija uskog organizacijskog okvira (okvira supersimetrije, što je analogija engleskog jezika) i "ograničenja minimalnosti" (minimalna masa za danu količinu električnog naboja, što je analogija minimalne duljine riječi s danim brojem ipsilona) znači da je identitet skrivenog sadržaja *jedinstveno* određen. Naime, fizičari su dokazali da se njegov identitet u potpunosti otkriva ako samo osiguramo da sadržaj kutije bude najlakši mogući koji ima dani naboj. Sastojci minimalne mase za danu vrijednost naboja poznati su kao BPS-stanja, u počast trojici otkrivača.[8]

Za BPS-stanja važno je da se njihova svojstva može jedinstveno, lako i egzaktno odrediti bez računa smetnji. To

---

[8] Stručni čitatelj prepoznat će da ti iskazi zahtijevaju takozvanu supersimetriju $N=2$.

vrijedi bez obzira na vrijednost konstante vezanja. Naime, čak i ako je konstanta vezanja velika, što implicira da pristup računa smetnji nije valjan, ipak možemo deducirati egzaktna svojstva BPS-konfiguracija. Ta svojstva se često naziva neperturbativnim masama i nabojima jer njihove vrijednosti izlaze izvan sheme perturbativnih aproksimacija računa smetnji. Zbog toga možemo reći da BPS znači i "bez perturbativnih situacija".

BPS-stanja odnose se samo na malen dio fizikalnih svojstava dane teorije struna, kad je njena konstanta vezanja velika, ali ipak nam daju opipljiv dojam o nekim značajkama njenog jakog vezanja. Kad konstanta vezanja u danoj teoriji struna poraste iznad granice koja je dostupna računu smetnji, svoje ograničeno razumijevanje temeljimo na BPS-stanjima. No, poput nekoliko odabranih riječi stranoga jezika, vidjet ćemo da će nas odvesti prilično daleko.

Slijedeći Wittena, počnimo s jednom od pet teorija struna, recimo s tipom I, i zamislimo da je svih devet njenih prostornih dimenzija ravno i neuvijeno. Naravno, to uopće nije realistično, ali tako je jednostavnije; uvijenim dimenzijama još ćemo se vratiti. Počinjemo s pretpostavkom da je konstanta vezanja mnogo manja od 1. U tom slučaju račun smetnji je valjan i stoga možemo precizno izračunati mnoga svojstva teorije, što smo i učinili. Ako povećamo vrijednost konstante vezanja ali tako da i dalje bude znatno manja od 1, još se možemo služiti računom smetnji. Detaljna svojstva teorije ponešto će se promijeniti – na primjer, brojčane vrijednosti povezane s odvajanjem jedne strune od druge bit će nešto drukčije jer procesi višestrukih petlji sa slike 12.6 imaju veći utjecaj kad je konstanta vezanja veća. No osim tih promjena detaljnih brojčanih svojstava, opći fizikalni sa-

držaj teorije ostaje isti, sve dok konstanta vezanja ostaje na području računa smetnji.

Kako povećavamo konstantu vezanja u teoriji tipa I iznad vrijednosti 1, metode računa smetnji postaju nevaljane i stoga se usmjeravamo samo na ograničen sklop neperturbativnih masa i naboja – BPS-stanja – koja su još unutar naše mogućnosti razumijevanja. Evo što je ustvrdio Witten, a što je kasnije i potvrđeno zajedničkim radom s Joeom Polchinskim s Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari: *Ta obilježja jakog vezanja u teoriji struna tipa I savršeno se slažu s poznatim svojstvima heterotičke-O teorije struna, kad ona ima malenu vrijednost svoje konstante vezanja struna.* Naime, kad je konstanta vezanja teoriji struna tipa I velika, konkretne mase i naboji koje znamo izvesti upravo su jednaki onima u heterotičkoj-O teoriji kad je njena konstanta vezanja malena. To nam pruža jaku indiciju da su te dvije teorije struna, koje se na prvi pogled doimaju poput vode i leda, kao da su posve različite, zapravo dvojne. Teorija tipa

I za velike vrijednosti svoje konstante vezanja *identična* je fizici heterotičke-O teorije za malene vrijednosti njene konstante vezanja. Srodni argumenti dali su jednako uvjerljive dokaze da vrijedi i obratno: fizika teorije tipa I za malene vrijednosti svoje konstante vezanja identična je fizici heterotičke-O teorije za velike vrijednosti njene konstante vezanja.[9] Iako se čini da su te dvije teorije struna nepovezane kad ih se analizira u okviru aproksimacija računa smetnji, sada vidimo da se jedna transformira u drugu – donekle slično transmutaciji vode u led i obratno – kad variramo vrijednost njihovih konstanti vezanja.

Taj presudni rezultat, u kojemu se fizika jakog vezanja

---

[9] Rečeno malo preciznije, ako konstantu vezanja struna u heterotičkoj-O teoriji struna nazovemo g_{HO}, a konstantu vezanja struna u teoriji tipa I nazovemo g_I, onda odnos između tih dviju teorija znači da su one fizikalno identične sve dok vrijedi $g_{HO} = 1/g_I$, što je ekvivalentno $g_I = 1/g_{HO}$. Kad je jedna konstanta velika, druga je malena.

opisuje fizikom slabog vezanja druge teorije, poznat je kao *dvojnost jakog i slabog*. Kao i kod drugih, već razmotrenih dvojnosti, ona nam kaže da te dvije teorije zapravo nisu različite. One samo nude dva različita opisa iste, osnovne teorije. Za razliku od trivijalne dvojnosti engleskog i kineskog jezika, dvojnost jakog i slabog vrlo je moćna. Kad je konstanta vezanja jednog člana dvojnoga para teorijâ malena, njezina fizikalna svojstva možemo analizirati služeći se dobro razvijenim instrumentima računa smetnji. No ako je konstanta vezanja u teoriji velika, pa se stoga modeli računa smetnji ruše, sada znamo da se možemo poslužiti dvojnim opisom – opisom u kojem je relevantna konstanta vezanja malena – i vratiti se upotrebi instrumenata računa smetnji. Rezultat prijevoda jest to što imamo kvantitativne metode za analizu teorije u kojoj smo prije mislili da je izvan našeg teorijskog dosega.

Uistinu dokazati da je fizika jakog vezanja teorije struna tipa I identična fizici slabog vezanja heterotičke-O teorije, i

obratno, krajnje je težak zadatak i to još nije ostvareno. Razlog je jednostavan. Jedan član para navodno dvojnih teorija nije dostupan analizi računa smetnji jer je njegova konstanta vezanja prevelika. To onemogućava izravne izračune mnogih njegovih fizikalnih svojstava. Zapravo, upravo zbog toga je predložena dvojnost tako moćna, jer ako je istinita, nudi nam novo sredstvo za analizu teorije s jakim vezanjem: primjenu metoda računa smetnji za analizu njezinog dvojnog opisa sa slabim vezanjem.

No iako ne možemo dokazati da su te dvije teorije dvojne, savršeno poklapanje tih svojstava *možemo* pouzdano izvesti, što je vrlo uvjerljiv dokaz da je pretpostavljeni odnos između vezanja u teoriji struna tipa I i heterotičkoj-O teoriji ispravan. Zapravo, sve domišljatiji izračuni koji su izvedeni u svrhu testiranja predložene dvojnosti dali su pozitivne rezultate. Teoretičari struna većinom su uvjereni da je dvojnost istinita.

Slijedeći isti pristup, možemo proučavati svojstva jakog vezanja i u ostalim teorijama, recimo u teoriji tipa IIB. Kao što su prvotno pretpostavili Hull i Townsend, a potkrijepili mnogi fizičari svojim istraživanjima, čini se da se događa nešto posebno. Kako se konstanta vezanja teorije struna tipa IIB povećava, fizikalna svojstva koja možemo razumjeti točno se poklapaju s onima u slabom vezanju same teorije tipa IIB. Drugim riječima, teorija tipa IIB je *samodvojna*.[10] Određenije rečeno, detaljna analiza uvjerljivo sugerira da, kad bi konstanta vezanja u teoriji tipa IIB bila veća od 1, i kad bismo tu vrijednost zamijenili njenom recipročnom vrijednošću (koja je, dakle, manja od 1), teorija koju bismo tako dobili bila bi apsolutno identična početnoj. Slično onome što smo pronašli kad smo pokušali stisnuti kružnu dimenziju do Planckove duljine, ako pokušamo povećati konstantu vezanja IIB na vrijednost veću od 1, samodvojnost pokazuje da je tako nastala teorija posve jednaka teoriji tipa IIB sa konstantom manjom od 1.

Sažetak, zasad

Pogledajmo dokle smo stigli. Krajem 1980-ih fizičari su konstruirali pet različitih teorija superstruna. U aproksimacijskoj shemi računa smetnji one se doimaju različitima. No ta aproksimacijska metoda valjana je samo ako je konstanta vezanja struna u danoj teoriji manja od 1. Očekivalo se da će fizičari moći precizno izračunati vrijednost konstante vezanja struna u svakoj pojedinoj teoriji, ali oblik aproksimacijskih jednadžbi koji je danas dostupan zasad to ne omogućava. Zbog toga fizičari nastoje proučavati svaku od

---

[10] To je bliska analogija dvojnosti R, $1/R$ o kojoj smo već govorili. Ako konstantu vezanja u teoriji tipa IIB nazovemo g_{IIB}, onda se doima točnim iskaz da vrijednosti g_{IIB} i $1/g_{IIB}$ opisuju iste fizikalne zakone. Ako je g_{IIB} velika, onda je $1/g_{IIB}$ malena i obratno.

pet teorija struna s obzirom na raspon mogućih vrijednosti njihovih konstanti vezanja, i kad su manje i kad su veće od 1 – naime, i slabog i jakog vezanja. No tradicionalne metode računa smetnji ne govore ništa o obilježjima jakog vezanja, ni za jednu teoriju struna.

U novije vrijeme, služeći se supersimetrijom, fizičari su naučili izračunavati neka svojstva jakog vezanja u danoj teoriji struna. Na opće iznenađenje, čini se da su svojstva jakog vezanja u heterotičkoj-O teoriji jednaka svojstvima slabog vezanja u teoriji tipa I, i obratno. Štoviše, fizika jakog vezanja u teoriji tipa IIB jednaka je svojim vlastitim svojstvima kad je vezanje slabo. Te neočekivane povezanosti potiču nas da slijedimo Wittena i poradimo na drugim dvjema teorijama struna, tip IIA i heterotičkoj-E, ne bismo li vidjeli kako se one uklapaju u opću sliku. Tu ćemo naići na još egzotičnija iznenađenja. Da bismo se pripremili na njih, potrebna nam je kratka povijesna digresija.

Supergravitacija

Krajem 1970-ih i početkom 1980-ih, prije porasta zanimanja za teoriju struna, mnogi teorijski fizičari tražili su ujedinjenu teoriju kvantne mehanike, gravitacije i drugih sila u okviru kvantne teorije polja točkastih čestica. Nadali su se da će nedosljednosti između teorija točkastih čestica koje uključuju gravitaciju i kvantne mehanike biti uklonjene proučavanjem teorija koje sadrže više simetrije. Godine 1976, Stanley Deser i Bruno Zumino na CERN-u, i neovisno o njima, Daniel Freedman, Sergio Ferrara i Peter Van Nieuwenhuisen, koji su tada radili na State University of New York u Stony Brooku, otkrili su da najviše obećavaju one teorije koje uključuju supersimetriju, jer tendencija bozona i fermiona da poništavaju svoje kvantne fluktuacije donekle smiruje burnu mikroskopsku groznicu. Autori su

skovali pojam *supergravitacija* kako bi opisali supersimetrične kvantne teorije polja koje pokušavaju uključiti općU relativnost. Ti pokušaji stapanja opće teorije relativnosti s kvantnom mehanikom na kraju nisu uspjeli. No ipak, kao što smo spomenuli u poglavlju 8, ta istraživanja urodila su važnom poukom, koja je bila vjesnik razvoja teorije struna.

Ta pouka, koja je najjasnije izražena u radu Eugenea Cremmera, Bernarda Julije i Scherka, koji su 1978. radili na Ecole Normale Supérieure, glasila je da su se uspjehu najviše približile one teorije supergravitacije koje nisu bile formulirane u četiri dimenzije, nego u više njih. Određenije rečeno, najviše su obećavale verzije koje su prizivale deset ili jedanaest dimenzija, pri čemu se pokazalo da je jedanaest najveći mogući broj dimenzija.[11] Doticaj s četiri empirijske dimenzije opet je postignut u okviru Kaluze i Kleina: dodatne dimenzije su uvijene. U teorijama s deset dimenzija, na primjer u teoriji struna, šest dimenzija je uvijeno, a u teoriji s jedanaest dimenzija, uvijeno ih je sedam.

Godine 1984, kad je teorija struna osvojila fizičare, pogled na supergravitaciju točkastih čestica dramatično se promijenio. Kao što smo više puta naglasili, ako istražujemo strunu s preciznošću koja nam je dostupna danas i u predvidljivoj budućnosti, ona *izgleda* poput točkaste čestice. Tu neformalnu primjedbu možemo izraziti i precizno: kad proučavamo niskoenergijske procese u teoriji struna – one procese koji nemaju dovoljno energije da ispitaju ultramikroskopsku, protežnu prirodu strune – strunu možemo aproksimirati točkastom česticom bez strukture, služeći se okvirom kvantne teorije polja točkastih čestica. Tom aproksimacijom ne možemo se poslužiti kad se bavimo visokoenergijskim procesima na kratkim udaljenostima jer znamo da je protežna priroda strune ključna za njezinu sposobnost

---

[11] Ako su uvijene sve osim četiri dimenzije, teorija s više od jedanaest dimenzija nužno daje čestice bez mase sa spinom većim od 2, što isključuju i teorijska razmatranja i rezultati eksperimenata.

da razriješi sukobe između opće relativnosti i kvantne mehanike koje teorija točkastih čestica ne može razriješiti. Ali na niskim energijama – na dovoljno velikim udaljenostima – tih problema nema, i takve aproksimacije često se izvode radi jednostavnosti izračuna.

Kvantna teorija polja koja na taj način najbolje aproksimira teoriju struna upravo je desetodimenzionalna supergravitacija. Posebna svojstva desetodimenzionalne supergravitacije, otkrivena 1970-ih i 1980-ih danas se smatraju niskoenergijskim ostacima moći teorije struna koja joj je u osnovi. Istraživači koji su proučavali desetodimenzionalnu supergravitaciju otkrili su vrh vrlo velikog ledenog brijega – bogate strukture teorije superstruna. Zapravo, pokazalo se da postoje četiri različite desetodimenzionalne teorije supergravitacije koje se razlikuju u pojedinostima s obzirom na precizan način uključivanja supersimetrije. Tri od te četiri teorije su niskoenergijske, točkastočestične aproksimacije teorije struna tipa IIA, tipa IIB i heterotičke-E teorije. Če-

tvrta teorija daje niskoenergijsku točkastočestičnu aproksimaciju i teorije tipa I i heterotičke-O teorije; danas nam je jasno da je to bila prva naznaka bliske povezanosti tih dviju teorija struna.

To je vrlo zgodna priča, osim što se čini da je iz nje izostavljena jedanaestodimenzionalna supergravitacija. Čini se da u teoriji struna, formuliranoj u deset dimenzija, nema mjesta na jedanaestodimenzionalnu teoriju. Većina teoretičara struna, ali ne i svi, godinama su držali da je jedanaestodimenzionalna supergravitacija nekakva matematička čudnovatost koja nema nikakve veze s fizikom teorije struna.[12]

---

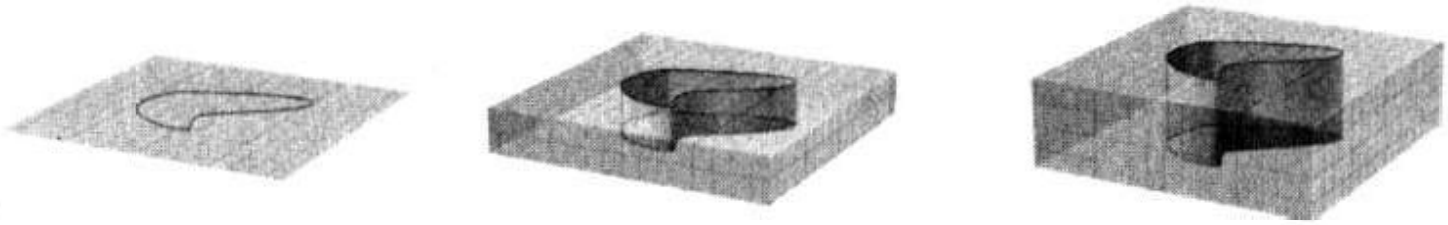
[12] Važna iznimka je rad iz 1987. Duffa, Paula Howea, Takea Inamija i Kelley Stelle u kojemu se oslanjaju na ranije spoznaje Erica Bergeshoeffa, Ergina Sezgina i Townsenda te tvrde da bi desetodimenzionalna teorija struna trebala imati duboku jedanaestodimenzionalnu povezanost.

To stajalište sada se promijenilo. Na konferenciji o strunama 1995. Witten je ustvrdio da, počnemo li od teorije tipa IIA i povećavamo joj konstantu vezanja od vrijednosti mnogo manje od 1 do vrijednosti mnogo veće od 1, fizika koju još možemo analizirati (u biti, fizika BPS-zasićenih konfiguracija) ima niskoenergijsku aproksimaciju koja je zapravo jedanaestodimenzionalna supergravitacija.

Kad je Witten objavio to otkriće, ono je zaprepastilo publiku i otad ne prestaje uzbuđivati zajednicu teoretičara struna. To gotovo nitko nije očekivao. Vaša prva reakcija na taj rezultat vjerojatno je jednaka onoj koju su izrazili stručnjaci: *kako teorija čije je posebno obilježje jedanaest dimenzija može biti relevantna za drukčiju teoriju, koja ih ima deset?*

Odgovor na to pitanje ima veoma veliku važnost. Da bismo ga razumjeli, moramo preciznije opisati Wittenov rezultat. To će nam biti lakše ako prvo opišemo srodan re-

zultat do kojeg su kasnije došli Witten i postdoktorand na Princetonu Petr Hořava, koji se odnosi na heterotičku-E teoriju. Otkrili su da heterotička-E struna s jakim vezanjem također ima jedanaestodimenzionalni opis, a na slici 12.7 vidimo i zašto. Na lijevom dijelu slike smatramo da je konstanta vezanja struna u heterotičkoj-E teoriji mnogo manja od 1. To područje opisivali smo u prethodnim poglavljima i teoretičari struna proučavali su ga više od deset godina. Kako se na slici 12.7 pomičemo udesno, postupno povećavamo konstantnu vezanja. Prije 1995. teoretičari struna znali su da tako procesi s petljama (vidi sliku 12.6) postaju sve važniji, i kako konstanta vezanja postaje sve veća, na kraju zbog njih cijeli okvir računa smetnji postaje nevaljan. No nitko nije očekivao da s porastom konstante vezanja postaje vidljiva cijela nova dimenzija! To je "vertikalna" dimenzija, prikazana na slici 12.7. Imajmo na umu da je na toj slici dvodimenzionalna mreža predstavlja svih devet prostornih



Slika 12.7 Kako se povećava konstanta vezanja u heterotičkoj-E teoriji, pojavljuje se nova prostorna dimenzija, a sama struna se isteže u oblik valjkaste membrane.

dimenzija heterotičke-E teorije. Dakle, nova, vertikalna dimenzija predstavlja *desetu* prostornu dimenziju, koja zajedno s vremenom, daje ukupan zbroj od jedanaest prostorno-vremenskih dimenzija.

Štoviše, slika 12.7 ilustrira duboku posljedicu te nove dimenzije. *Struktura* heterotičke-E teorije mijenja se kako ta dimenzija raste. Iz jednodimenzionalne petlje rasteže se u vrpcu i potom, kako povećavamo konstantu vezanja, u deformirani valjak! Drugim riječima, heterotička-E struna zapravo je dvodimenzionalna membrana čijom širinom (vertikalna protežnost na slici 12.7) upravlja veličina kon-

stante vezanja. Teoretičari struna su više od deset godina primjenjivali metode računa smetnji, koje se zasnivaju na pretpostavci da je konstanta vezanja veoma malena. Kako je ustvrdio Witten, zbog te pretpostavke su osnovni sastojci izgledali i ponašali se kao jednodimenzionalne strune, iako zapravo imaju skrivenu drugu prostornu dimenziju. Kad odbacimo pretpostavku da je konstanta vezanja veoma malena i pogledamo fiziku heterotičke-E teorije kad je konstanta velika, pojavljuje se druga dimenzija.

To saznanje ne obezvređuje nijedan od zaključaka do kojih smo došli u prethodnim poglavljima, ali nas prisiljava da ih sagledamo u novom okviru. Na primjer, kako se sve to slaže s jednom vremenskom i devet prostornih dimenzija koje teorija struna zahtijeva? Pa, prisjetimo se iz poglavlja 8 da to ograničenje potječe od brojanja nezavisnih smjerova u kojima struna može titrati, i od zahtjeva da taj broj bude upravo takav da kvantnomehaničke vjerojatnosti imaju razumne vrijednosti. Nova dimenzija koju smo upravo otkrili

nije takva da u njoj može titrati heterotička-E struna, jer je zatvorena u strukturi samih "struna". Drukčije rečeno, okvir računa smetnji kojim su se fizičari služili pri izvođenju zahtjeva o desetodimenzionalnom prostorvremenu od početka je pretpostavljao da je heterotička-E konstanta vezanja malena. Iako se to shvatilo tek mnogo kasnije, to je implicitno potkrijepilo dvije uzajamno konzistentne aproksimacije: da je širina membrane na slici 12.7 malena, pa ona stoga izgleda kao struna, i da je jedanaesta dimenzija *tako* malena da je perturbativne jednadžbe ne mogu dokučiti. U toj aproksimacijskoj shemi sugerira nam se desetodimenzionalni svemir ispunjen jednodimenzionalnim strunama. Sada vidimo da je to samo aproksimacija jedanaestodimenzionalnoga svemira koji sadrži dvodimenzionalne membrane.

Iz tehničkih razloga, Witten je prvo nadošao na jedanaestu dimenziju proučavajući svojstva jakog vezanja u teoriji tipa IIA, a tu je priča vrlo slična. Kao i u primjeru s heterotičkom-E teorijom, i tu je jednanaesta dimenzija čijom veli-

činom upravlja konstanta vezanja tipa IIA. Kako se ona povećava, tako raste i nova dimenzija. Witten je ustvrdio da se struna tipa IIA, umjesto da se protegne u vrpcu kao u slučaju heterotičke-E strune, proširuje u "unutarnju cijev", kako je ilustrirano na slici 12.8. Nadalje, nastavlja Witten, iako su teoretičari uvijek smatrali strune tipa IIA jednodimenzionalnim objektima, koji imaju samo duljinu a ne i debljinu, to gledište je odraz sheme aproksimacija računa smetnji u kojoj se pretpostavlja da je konstanta vezanja struna malena. Ako priroda *doista* zahtijeva malenu vrijednost te konstante vezanja, onda je to vjerodostojna aproksimacija. Ipak, argumenti Wittena i drugih fizičara u vrijeme druge revolucije superstruna pružaju jake dokaze da su strune tipa IIA i heterotičke-E strune u biti dvodimenzionalne membrane u jedanaestodimenzionalnom svemiru.

Ali, što je ta jedanaestodimenzionalna teorija? Na niskim energijama (niskim u usporedbi s Planckovom energijom),

Slika 12.8 Kako se povećava konstanta vezanja struna u teoriji tipa IIA, strune se od jednodimenzionalnih petlji proširuju u dvodimenzionalne objekte koji izgledaju kao površina zračnice biciklističke gume.

kako su ustvrdili Witten i drugi, njezina aproksimacija je dugo zanemarivana jedanaestodimenzionalna supergravitacijska kvantna teorija polja. No, kako možemo opisati tu teoriju na višim energijama? To je pitanje danas predmet intenzivnih istraživanja. Na slikama 12.7 i 12.8 vidimo da jedanaestodimenzionalna teorija sadrži dvodimenzionalne

protežne objekte – dvodimenzionalne membrane. Kao što ćemo uskoro vidjeti, važnu ulogu imaju i protežni objekti u drugim dimenzijama. No, osim zbrke raznih svojstava, *nitko ne zna što ta jedanaestodimenzionalna teorija zapravo jest*. Jesu li membrane njezine fundamentalne sastavnice? Koja su njena odredbena svojstva? U kakvom je doticaju s fizikom kakvu poznajemo? Ako su konstante vezanja malene, naši najbolji odgovori na ta pitanja već su opisani u prethodnim poglavljima, jer se u tom slučaju vraćamo na teoriju o strunama. Ali ako konstante vezanja nisu tako malene, onda zasad nitko ne zna odgovore na ta pitanja.

Kakva god bila ta jedanaestodimenzionalna teorija, Witten ju je privremeno nazvao *M-teorijom*. Taj naziv znači mnogo toga – ovisno o tome koga pitate. Evo nekih primjera: Misteriozna teorija, Majka svih teorija, Teorija membrana (jer su membrane u svakom slučaju dio te priče), Teorija matrica (po novijem radu Toma Banksa sa sveučilišta Rutgers, Willyja Fischlera s Teksaškog sveučilišta u Austinu,

Stephena Shenkera s Rutgersa, i Susskinda, koji nudi novu interpretaciju teorije). No iako nam ni naziv ni svojstva nisu baš jasni, posve je jasno da M-teorija pruža osnovu za ujedinjenje svih pet teorija struna.

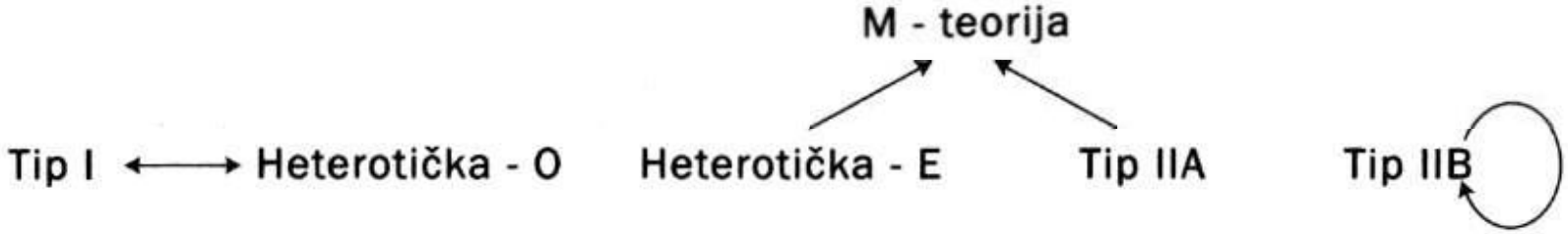
M-teorija i mreža međupovezanosti

Znamo staru priču o trojici slijepaca i slonu. Prvi slijepac uhvati slonovu bjelokosnu kljovu i opiše glatku, čvrstu površinu koju je napipao. Drugi slijepac uhvati jednu slonovu nogu i opiše grubu, mišićavu masu. Treći slijepac uhvati slonov rep i opiše vitki, uvijeni organ koji je dohvatio. Budući da im se opisi tako razlikuju, a nijedan od njih ne vidi drugoga, svi oni misle da su napipali različite životinje. Fizičari su godinama tapkali u istom mraku kao i ti slijepci, misleći da su različite teorije struna *vrlo* različite. Ali sada, na temelju spoznaja druge revolucije superstruna, fizičari su shvatili

da je M-teorija nalik na slonovsku kožu koja ujedinjuje svih pet teorija struna.

U ovom poglavlju raspravljamo o promjenama u našem razumijevanju teorije struna koje nastaju kad izađemo izvan okvira računa smetnji – kojom smo se implicitno služili prije ovog poglavlja. Slika 12.9 prikazuje dosadašnji sažetak svih međuodnosa, pri čemu strelice naznačuju dvojne teorije. Kao što vidimo, imamo mrežu povezanosti, ali ona još nije potpuna. Možemo je dovršiti ako uključimo i dvojnosti iz poglavlja 10.

Prisjetimo se dvojnosti velikog i malenog kružnog polumjera, u kojoj je kružna dimenzija polumjera R jednako vrijedna kao i ona čiji je polumjer $1/R$. Već smo dotaknuli jedan aspekt te dvojnosti, a sada ga moramo objasniti. U poglavlju 10 raspravljali smo o svojstvima struna u svemiru s kružnom dimenzijom ali nismo precizno rekli na koju od pet formulacija teorije struna smo se oslanjali. Ustvrdili smo da nam uzajamna razmjenjivost modusa navijanja i titranja

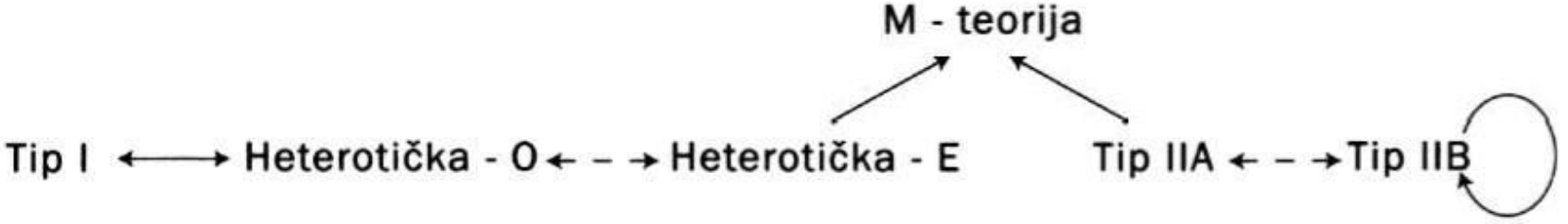


Slika 12.9 Strelice pokazuju koje su teorije dvojne.

struna omogućuje da u teoriji struna izrazimo opis svemira s kružnom dimenzijom polumjera $1/R$ kao svemir s polumjerom R. Samo smo dotaknuli tvrdnju da su zbog te dvojnosti razmjenjive teorije tipa IIA i IIB, kao i heterotička-O i heterotička-E teorija. Naime, dvojnost velikog i malenog polumjera preciznije se ovako izražava: fizika teorije struna tipa IIA u svemiru s kružnom dimenzijom polumjera R apsolutno je identična fizici teorije tipa IIB u svemiru s kružnom dimenzijom polumjera $1/R$ (slično vrijedi za heterotičku-E i heterotičku-O teoriju). Taj precizniji izraz dvojnosti velikog i malenog polumjera nema nikakvog utjecaja na zaključke iz poglavlja 10, ali znatno utječe na našu sadašnju raspravu.

Razlog tome je to što povezanošću teorije struna tipa IIA

i tipa IIB, kao i heterotičke-O i heterotičke-E teorije, dvojnost velikog i malenog polumjera dovršava mrežu povezanosti, što je ilustrirano crtkanim linijama na slici 12.10. Ta slika pokazuje da su svih pet teorija struna, zajedno s M-teorijom, međusobno dvojne. Utkane su u isti teorijski okvir i nude pet različitih pristupa opisivanju jedne te iste fizike u osnovi svega. Ovaj ili onaj izraz može biti prikladniji za ovu ili onu primjenu. Na primjer, mnogo je lakše raditi s heterotičkom-O teorijom slabog vezanja nego s jako vezanom strunom u teoriji tipa I. No ipak, sve one izražavaju posve istu fiziku.



Slika 12.10 Uključujući dvojnosti u vezi s geometrijskim oblikom prostorvremena (kao u poglavlju 10), svih pet teorija struna i M-teorija spajaju se u pravoj mreži dvojnosti.

Opća slika

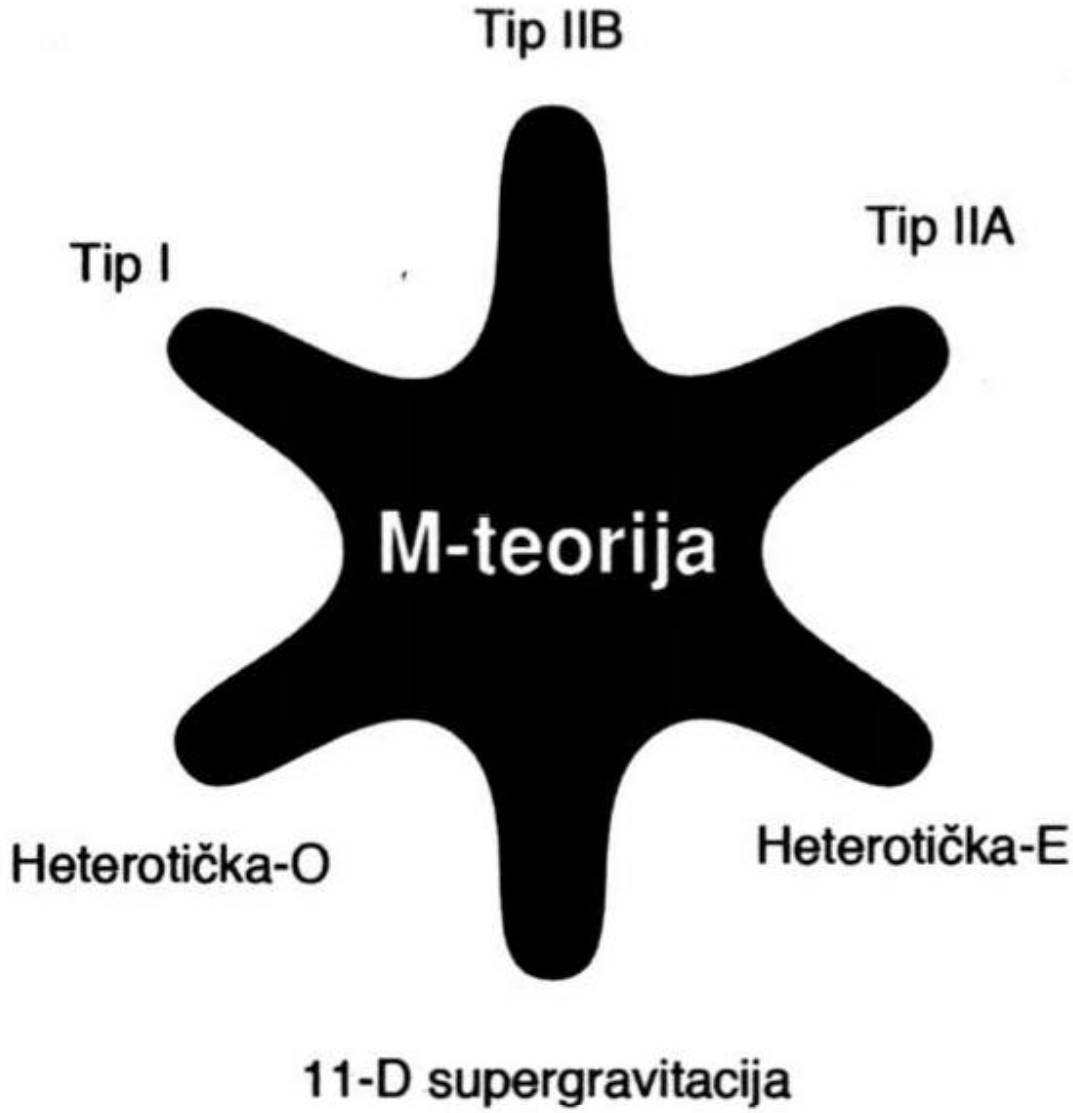
Sada možemo bolje razumjeti slike 12.1 i 12.2 koje smo predstavili na početku ovog poglavlja kako bismo sažeto izrazili glavne tvrdnje. Na slici 12.1 vidimo da smo prije 1995, jer nismo uzimali u obzir dvojnosti, imali pet naizgled različitih teorija struna. Fizičari su radili na ovoj ili onoj, ali nisu razumijevali dvojnosti i činilo im se da su teorije različite. Svaka teorija imala je promjenjiva svojstva, poput veličine konstante vezanja i geometrijskog oblika i veličine uvijenih dimenzija. Postojala je nada (i dalje postoji) da će se ta određujuća svojstva iznaći u samoj teoriji, ali ne uspijevajući ih izračunati aproksimacijskim jednadžbama, fizičari su proučavali fiziku koja slijedi iz cijelog raspona mogućnosti. Na slici 12.1 to je prikazano zasjenjenim područjima – svaka točka na takvom području predstavlja jedan poseban izbor konstante vezanja i uvijene geometrije. Ako ne uzmemo u obzir dvojnosti, i dalje imamo pet nepovezanih (skupova)

teorija.

No sada, ako primijenimo sve dvojnosti o kojima smo raspravljali, onda variranjem parametara vezanja i geometrije možemo prelaziti iz svake teorije u svaku drugu, sve dok uključujemo i središnje, ujedinjujuće područje M-teorije; to je prikazano na slici 12.2. Premda tek slabašno razumijemo M-teoriju, ti neizravni argumenti snažno podupiru tvrdnju da je ona ujedinjujuća osnova za pet prividno različitih teorija struna. Štoviše, doznali smo da je M-teorija blisko povezana i sa šestom teorijom – jedanaestodimenzionalnom supergravitacijom – a to izražava slika 12.11, preciznija verzija slike 12.2.[13]

---

[13] Preciznije govoreći, taj dijagram treba interpretirati u smislu da imamo jednu jedinu teoriju koja ovisi o više parametara. Među tim parametrima su konstante vezanja struna, kao i parametri geometrijske veličine i oblika. Načelno bismo trebali moći poslužiti se tom teorijom kako bismo izračunali konkretne vrijednosti za sve te



Slika 12.11 Uključivanjem dvojnosti, svih pet teorija struna, jedanaestodimenzionalna supergravitacija i M-teorija stapaju se u ujedinjujući okvir.

Slika 12.11 ilustrira da fundamentalne ideje i jednadžbe M-teorije, iako ih zasad samo djelomice razumijemo, ujedinjuju one u svim formulacijama teorije struna. M-teorija je teorijski slon koji je teoretičarima struna otvorio oči za daleko širi ujedinjujući okvir.

---

parametre – konkretnu vrijednost za konstantu interakcije struna i konkretnom obliku geometrije prostorvremena – ali u okviru svog današnjeg teorijskog razumijevanja ne znamo kako to postići. Stoga, kako bi bolje razumjeli teoriju, teoretičari struna proučavanju njena svojstva u punom rasponu vrijednosti tih parametara. Ako se vrijednosti parametara odaberu tako da leže na šest poluotočnih područja sa slike 12.11, onda teorija ima svojstva jedne od pet teorija struna, ili jedanaestodimenzionalne supergravitacije, kao što je označeno. Ako parametre odaberemo tako da leže u središnjem području, onda zakonima fizike vlada još uvijek tajanstvena M-teorija.

Iznenađujuće svojstvo M-teorije: demokracija u širenju

Kad je konstanta vezanja struna malena u bilo kojem od pet poluotočnih područja teorijske karte na slici 12.11, čini se da je fundamentalni sastojak teorije jednodimenzionalna struna. Međutim, upravo smo dobili novi pogled na to saznanje. Počnemo li na području heterotičke-E ili tipa IIA i povećamo vrijednost njihovih konstanti vezanja, krenut ćemo prema središtu karte na slici 12.11, i ono što se doimalo poput jednodimenzionalne strune izdužuje se u dvodimenzionalne membrane. Štoviše, manje ili više zamršenim nizom odnosa dvojnosti, koji uključuju i konstante vezanja struna i precizan oblik uvijenih prostornih dimenzija, možemo kontinuirano prelaziti iz svake točke na slici 12.11 na svaku drugu. Budući da se dvodimenzionalne membrane na

koje smo naišli u heterotičkoj-E i tipa IIA perspektivi mogu slijediti kako prelazimo na ostale tri formulacije struna na slici 12.11, doznajemo da svaka od pet formulacija struna također sadrži dvodimenzionalne membrane.

Stoga se nameću dva pitanja. Prvo, jesu li dvodimenzionalne membrane istinski fundamentalne sastavnice teorije struna? I drugo, nakon odvažnog skoka iz 1970-ih i s početka 1980-ih, s točkastih čestica bez dimenzija na jednodimenzionalne strune, i nakon što smo vidjeli da teorija struna zapravo sadrži dvodimenzionalne membrane, bi li moglo biti da u teoriji postoje sastojci s još više dimenzija? Dok ovo pišem, odgovori na ta pitanja još nisu u potpunosti poznati, ali čini se da je situacija sljedeća.

Oslonili smo se na supersimetriju u nadi da ćemo razumjeti sve formulacije teorije struna i izvan područja valjanosti metoda aproksimacija računa smetnji. Konkretno, supersimetrija jedinstveno određuje svojstva BPS-stanja, njihove mase i naboje sila, a to nam je omogućilo da razumijemo neka njihova obilježja jakog vezanja a da ne mora-

mo izvoditi vrlo zahtjevne izravne izračune. Zapravo, zbog početnih napora Horowitza i Stromingera, i kasnijeg, revolucionarnog Polchinskijevog rada, sada znamo još više o tim BPS-stanjima. Konkretno, ne samo da im znamo mase i naboje sila, nego jasno vidimo i kako *izgledaju*. A ta slika vjerojatno je najveće od svih iznenađenja. Neka BPS-stanja su jednodimenzionalne strune. Druga su dvodimenzionalne membrane. Ti oblici već su nam dobro poznati. No, iznenađenje je u tome što su drugi oblici trodimenzionalni, četverodimenzionalni – zapravo, opseg mogućnosti obuhvaća sve prostorne dimenzije do *devete*. Teorija struna, M-teorija, kako god je na kraju nazvali, doista sadrži protežne objekte u obilju različitih prostornih dimenzija. Fizičari su skovali izraz *tro*brane za protežne objekte s tri prostorne dimenzije, *četvero*brane za one s četiri prostorne dimenzije, i tako sve do devetobrana (općenito, za objekt s p prostornih dimenzija, gdje p predstavlja cijeli broj, fizičari su skovali nimalo milozvučan izraz *p-brana*). Primjenom te termino-

nimalo imozvučan izraz *p-brana*). Primjenom te terminologije strune se katkad opisuju kao jednobrane, a membrane kao dvobrane. Činjenica da su svi ti protežni objekti zapravo dio teorije navela je Paula Townsenda da objavi "demokraciju brana".

No unatoč demokraciji brana, strune – jednodimenzionalni protežni objekti – posebne su, iz sljedećeg razloga. Fizičari su dokazali da je masa protežnih objekata svih dimenzija osim jednodimenzionalnih struna *obratno* proporcionalna vrijednosti pridružene konstante vezanja struna, na svakom od pet područja struna sa slike 12.11. To znači da su uz slabo vezanje struna, u svih pet formulacija, sve brane osim struna ekstremno masivne – za red veličine teže od Planckove mase. Budući da su tako teške i prema $E = mc^2$ zahtijevaju tako nezamislivo veliku energiju da bi nastale, brane imaju tek malen utjecaj na velik dio fizike (ali ne i na svu, kao što ćemo vidjeti u sljedećem poglavlju). Međutim, kao se upustimo izvan poluotočnih područja sa

slike 12.11, višedimenzionalne brane postaju lakše, a time i sve važnije.[14]

I tako se oblikuje sljedeća slika: na središnjem području slike 12.11 imamo teoriju čiji osnovni sastojci nisu samo strune i membrane, nego "brane" raznih dimenzija, manje ili više ravnopravnih. Do danas još nismo dokučili mnoga bitna obilježja te teorije kao cjeline. No znamo da prelaskom sa središnjeg područja na bilo koje poluotočno područje, samo strune (ili membrane uvijene tako da izgledaju kao strune, kao na slikama 12.7 i 12.8) dovoljno su lagane da bi mogle imati ikakav doticaj s fizikom kakvu poznajemo – s česticama u tablici 1.1 i s četirima silama kojima međudjeluju. Analize koje su teoretičari struna računom smetnji izvodili gotovo dvadeset godina nisu dovoljno istančane da bi otkrile makar i postojanje supermasivnih protežnih objekata drugih dimenzija; u analizama su dominirale strune i teorija je dobila svoje ne baš demokratsko ime "teorija struna". Ponovit ćemo da na tim područjima sa slike 12.11

možemo utemeljeno zanemariti sve osim struna. U biti, to smo u ovoj knjizi dosad i činili. No sada vidimo da je teorija u stvarnosti mnogo bogatija nego što je to itko očekivao.

Odgovara li išta od navedenoga na goruća pitanja teorije struna?

I da i ne. Uspjeli smo produbiti svoje razumijevanje tako što smo se oslobodili nekih zaključaka, koji su bili rezultat aproksimacijskih analiza računa smetnji, a ne prave fizike

---

[14] No trebali bismo napomenuti da čak i u poluotočnim područjima postoje neki egzotični načini na koje brane mogu imati utjecaja na poznatu nam fiziku. Na primjer, predlaže se da bi naše tri protežne prostorne dimenzije mogle i same biti trobrana, velika i neuvijena. Ako je tako, onda bismo u svom svakodnevnom životu jedrili po unutrašnjosti trodimenzionalne brane. Danas se istražuju takve mogućnosti.

struna. No neperturbativne metode zasad su prilično ograničene. Otkriće nevjerojatne mreže odnosa dvojnosti pruža nam daleko širi uvid u teoriju struna, ali mnoga pitanja i dalje ostaju neriješena. Na primjer, zasad ne znamo nadići aproksimacijske jednadžbe za vrijednost konstante vezanja struna – jednadžbe koje su, kao što smo vidjeli, pregrube da bi nam dale ikakve korisne informacije. Ništa bolje ne znamo ni zašto postoje upravo tri protežne prostorne dimenzije, niti znamo precizno odrediti oblik uvijenih dimenzija. Za ta pitanja potrebne su istančanije neperturbativne metode od onih koje zasad imamo.

Ali imamo mnogo dublje razumijevanje logičke strukture i teorijskog dosega teorije struna. Prije saznanja prikazanih na slici 12.11, jako vezanje bilo je zagonetka u svim teorijama struna. Kao na starim kartama, područje jakog vezanja bilo je neucrtani teritorij, potencijalno nastanjen zmajevima i morskim čudovištima. No danas vidimo da, jako će nas putovanje prema jakom vezanju odvesti u ne-

poznata područja M-teorije, na kraju ćemo se iskrcati na poznatim obalama slabog vezanja – i to u jeziku dvojnosti koji izražava ono što smo prije smatrali različitim teorijama struna.

Dvojnost i M-teorija ujedinjuju pet teorija struna i tako naznačuju važan zaključak. Možda više ni nema drugih iznenađenja, usporedivih s onima koja smo izložili. Kad kartograf iscrta sva područja na globusu, karta je gotova i znanje zemljopisa je potpuno. To ne znači da istraživanja na Antarktici ili na udaljenim mikronezijskim otocima nemaju znanstvenu i kulturnu vrijednost. To znači samo da je doba geografskih otkrića iza nas. Na globusu više nema bijelih mrlja. "Teorijska karta" sa slike 12.11 ima sličnu ulogu u teoriji struna. Ona obaseže cio raspon teorija do kojih se može doploviti polazeći od svakog od pet modela struna. Iako smo još daleko od potpunog razumijevanja *terrae incognitae* M-teorije, na karti više nema bijelih mrlja. Poput

kartografa, teoretičar struna sada može s opreznim optimizmom ustvrditi da je sav spektar logički utemeljenih teorija koje sadrže bitna otkrića iz prošlog stoljeća – specijalnu i opću teoriju relativnosti, kvantnu mehaniku, baždarne teorije jake, slabe i elektromagnetske sile, supersimetriju i dodatne dimenzije Kaluze i Kleina – u potpunosti kartografiran na slici 12.11.

Izazov za teoretičara struna – a možda bismo trebali reći, za M-teoretičara – jest pokazati da *neka* točka na teorijskoj karti na slici 12.11 uistinu opisuje naš svemir. Za to je potrebno otkriti potpune i egzaktne jednadžbe čije rješenje će pokazati tu zagonetnu točku na karti, i potom dovoljno dobro razumjeti odgovarajuću fiziku kako bi se moglo obaviti usporedbe u eksperimentima. Kako je rekao Witten: "Razumjeti što M-teorija uistinu jest – fiziku koju utjelovljuje – značilo bi promijeniti naše razumijevanje prirode jednako radikalno kao što smo ga promijenili velikim znanstvenim revolucijama u prošlosti."[15] To je program ujedinjenja u dva-

desetprvom stoljeću.

---

15 Razgovor s Edwardom Wittenom 11. svibnja 1998.

TRINAESTO POGLAVLJE

Crne rupe: perspektiva teorije struna / M-teorije

Prije teorije struna, sukob između opće teorije relativnosti i kvantne mehanike vrijeđao je naš dubok dojam da bi se zakoni prirode trebali uklapati u koherentnu cjelinu. No taj sukob bio je više od apstraktne podjele. Ekstremni fizikalni uvjeti koji su nastali u trenutku velikog praska i koji vladaju

u crnim rupama *ne mogu* se razumjeti bez kvantnomehaničke formulacije gravitacijske sile. Otkriće teorije struna daje nam nadu da ćemo razriješiti te tajne. U ovom i sljedećem poglavlju opisat ćemo koliko su daleko teoretičari struna dospjeli na putu prema razumijevanju crnih rupa i porijekla svemira.

Crne rupe i elementarne čestice

Na prvi pogled teško je zamisliti što bi se od čega moglo razlikovati više nego što se crne rupe razlikuju od elementarnih čestica. Crne rupe obično zamišljamo kao najveća svemirska tijela, dok su elementarne čestice najmanje trunčice materije. No, istraživanja mnogih fizičara krajem 1960-ih i početkom 1970-ih, među kojima su bili Demetrios Christodoulou, Werner Israel, Richard Price, Brandon Carter, Roy

Kerr, David Robinson, Hawking i Penrose, pokazala su da se crne rupe možda i ne razlikuju od elementarnih čestica koliko se prije mislilo. Ti fizičari pronalazili su sve uvjerljivije dokaze za saznanje koje je John Wheeler izrazio izjavom da "crne rupe nemaju dlaka". Time je želio reći da su sve crne rupe slične, a razlikuju se samo po malom broju obilježja. Koja su to obilježja? Prvo je, naravno, masa crne rupe. A ostala? Istraživanja su pokazala da su to električni naboj i naboji nekih drugih sila koje crna rupa može prenositi, i brzina kojom se vrti. I to je sve. Dvije crne rupe jednakih masa, jednakih naboja i spina u potpunosti su identične. Crne rupe nemaju nikakvu "frizuru" – to jest, druga karakteristična obilježja – po kojima bi se razlikovale. Tu bi nam se trebala upaliti žaruljica. Prisjetimo se da se upravo po tim svojstvima – masi, nabojima sila i spinu – razlikuju i elementarne čestice. Ta sličnost razlikovnih obilježja navela je mnoge fizičare na neobičnu spekulaciju da bi crne rupe zapravo mogle biti divovske elementarne čestice.

Zapravo, prema Einsteinovoj teoriji, ne postoji nikakva minimalna masa koju bi crna rupa mogla imati. Ako komad tvari bilo koje mase sabijemo na dovoljno malenu veličinu, izravnom primjenom opće teorije relativnosti dobit ćemo da će se ona pretvoriti u crnu rupu. (Što je ta masa manja, to ćemo je više morati sabiti.) Dakle, možemo zamisliti misaoni eksperiment u kojemu počinjemo sa sve lakšim grudicama tvari, sabijamo ih u sve manje crne rupe i uspoređujemo svojstva tako nastalih crnih rupa sa svojstvima elementarnih čestica. Wheelerova izjava o nemanju frizure navodi nas na zaključak da će crne rupe koje bismo tako stvorili u velikoj mjeri nalikovati elementarnim česticama. I jedne i druge izgledale bi poput sićušnih grudica koje u potpunosti karakteriziraju masa, naboji sila i spin.

Ali, tu se krije i kvaka. Astrofizičke crne rupe, s masom mnogo puta većom od mase Sunca, tako su velike i teške da je kvantna mehanika u velikoj mjeri irelevantna, i da

bismo razumjeli njihova svojstva, potrebno je primijeniti samo jednadžbe opće teorije relativnosti. (Ovdje raspravljamo samo o općoj strukturi crne rupe, a ne o središnjoj točki urušavanja unutar crne rupe, čija sićušnost zahtijeva kvantnomehanički opis.) No ako pokušamo stvoriti crne rupe još manje mase, dolazimo do trenutka kad one postanu tako lagane i malene da u igru ipak ulazi kvantna mehanika. To se događa kad ukupna masa crne rupe postane približno jednaka Planckovoj masi ili je manja. (S gledišta fizike elementarnih čestica, Planckova masa je golema – oko deset milijardi milijardi puta veća od mase protona. No sa stajališta crnih rupa, Planckova masa, koja je jednaka masi prosječne čestice prašine, prilično je malena.) I tako, fizičari koji su spekulirali da bi sićušne crne rupe i elementarne čestice mogle biti blisko povezane naišli su na neuskladivost opće teorije relativnosti – teorijske srži crnih rupa – i kvantne mehanike. Ta neuskladivost u prošlosti je zaustavljala svaki napredak u tom zanimljivom smjeru.

Omogućuje li nam teorija struna da krenemo naprijed?

Da. Prilično neočekivanom i istančanom spoznajom o crnim rupama, teorija struna pruža prvu teorijski utemeljenu povezanost između crnih rupa i elementarnih čestica. Put do te povezanosti pomalo je vijugav, ali vodi nas kroz neke vrlo zanimljive procese u teoriji struna; na takvo putovanje doista vrijedi poći.

Ono počinje naizgled nepovezanim pitanjem kojim se teoretičari struna bave od kraja 1980-ih. Matematičari i fizičari već dugo znaju da, kad je šest prostornih dimenzija uvijeno u Calabi-Yauov prostor, uglavnom postoje dvije vrste sfera utjelovljenih unutar tkiva tog oblika. Prva vrsta su dvodimenzionalne sfere, poput površine lopte, koje su

igrale važnu ulogu u inverznim prijelazima iz poglavlja 11. Drugu vrstu sfera teže je prikazati, ali one su jednako česte. To su *tro*dimenzionalne sfere – poput površine lopte na pjeskovitoj obali oceana u svemiru s *četiri* protežne prostorne dimenzije. Naravno, kao što smo izložili u poglavlju 11, obična lopta u našem svijetu je trodimenzionalni objekt, ali njezina površina *dvo*dimenzionalna je, poput površine vrtnoga crijeva: potrebna su vam samo dva broja – na primjer, geografska širina i dužina – da biste odredili svaki položaj na njezinoj površini. No sada zamišljamo da imamo još jednu prostornu dimenziju: četverodimenzionalnu loptu čija je površina *tro*dimenzionalna. Budući da je gotovo nemoguće zamisliti takvu loptu za plažu, najčešće ćemo se morati pozivati na analogije u nižim dimenzijama, koje je lakše vizualizirati. No, kao što ćemo sada vidjeti, jedan aspekt trodimenzionalne prirode sfernih površina veoma je važan.

Proučavajući jednadžbe teorije struna, fizičari su shvatili da je moguće, pa čak i vjerojatno, da se te trodimenzional-

ne sfere s vremenom smanje – uruše se – do gotovo nezamjetnog obujma. No što bi se dogodilo, upitali su teoretičari struna, kad bi se tkivo prostora urušilo na taj način? Bi li takvo "štipanje" prostornog tkiva prouzročilo kakve katastrofalne posljedice? To je nalik na pitanje koje smo postavili i riješili u poglavlju 11, ali ovdje se usredotočujemo na urušavanje trodimenzionalnih sfera, dok smo u poglavlju 11 razmatrali samo urušavanje dvodimenzionalnih sfera. (Kao i u poglavlju 11, budući da zamišljamo da se smanjuje dio Calabi-Yauovog oblika, a ne cijeli, poistovjećenje velikog i malog polumjera tu ne vrijedi.) Evo bitne kvalitativne razlike do koje dolazi zbog promjene dimenzije.[1] Iz poglavlja 11 sje-

---

[1] Stručni čitatelj znat će da se u uvjetima zrcalne simetrije urušavajuća trodimenzionalna sfera na jednom Calabi-Yauovom prostoru može preslikati na urušavajuću dvodimenzionalnu sferu na zrcalnom Calabi-Yauovom prostoru – što nas naizgled vraća u situaciju inverznih prijelaza opisanih u poglavlju 11. Međutim, razlika je u tome što takvo zrcalno izražavanje rezultira time da asimetrično

ćamo se da glavna spoznaja glasi da strune, gibajući se prostorom, mogu obuhvatiti dvodimenzionalnu sferu. To jest, njihova dvodimenzionalna svjetska površina može u potpunosti okružiti dvodimenzionalnu sferu, kao na slici 11.6. Pokazalo se da je to upravo dovoljna zaštita od mogućnosti da dvodimenzionalna sfera koja se urušava prouzroči fizikalnu katastrofu. No sada gledamo drugu vrstu sfere unutar Calabi-Yauovog prostora, a ona ima previše dimenzija da bi je struna koja se giba mogla okružiti. Ako vam je teško to razumjeti, jednostavno zamislite analogiju u kojoj su sve dimenzije smanjene za jedan. Trodimenzionalne sfere možete zamisliti kao da su to dvodimenzionalne površine običnih lopti za plažu, ako pritom zamišljate jednodimenzionalne strune kao da su to točkaste čestice bez dimenzija. Tada, po analogiji s činjenicom da točkasta čestica bez dimenzija ne može okružiti ništa, a kamoli dvodimenzionalnu sferu, jednodimenzionalna struna ne može obuhvatiti trodimenzionalnu sferu.

Takva logika navela je teoretičare struna na spekulaciju da, kad bi se urušila trodimenzionalna sfera unutar Calabi-Yauovog prostora, a aproksimativne jednadžbe pokazuju da je to itekako moguć, ako ne i uobičajen razvoj događaja u teoriji struna, to bi moglo prouzročiti kataklizmički ishod. Zapravo, aproksimativne jednadžbe teorije struna koje su razvijene prije sredine 1990-ih davale su naznake da bi se mehanizam univerzuma zaustavio kad bi to takvog urušavanja doista došlo; sugerirale su da bi se takvim štipanjem prostornog tkiva oslobodile neke od beskonačnosti koje je ukrotila teorija struna. Teoretičari struna godinama su morali živjeti s tako uznemirujućim, premda nepotpunim saznanjem. Ali 1995. Andrew Strominger dokazao je da su te zabrinjavajuće spekulacije bile pogrešne.

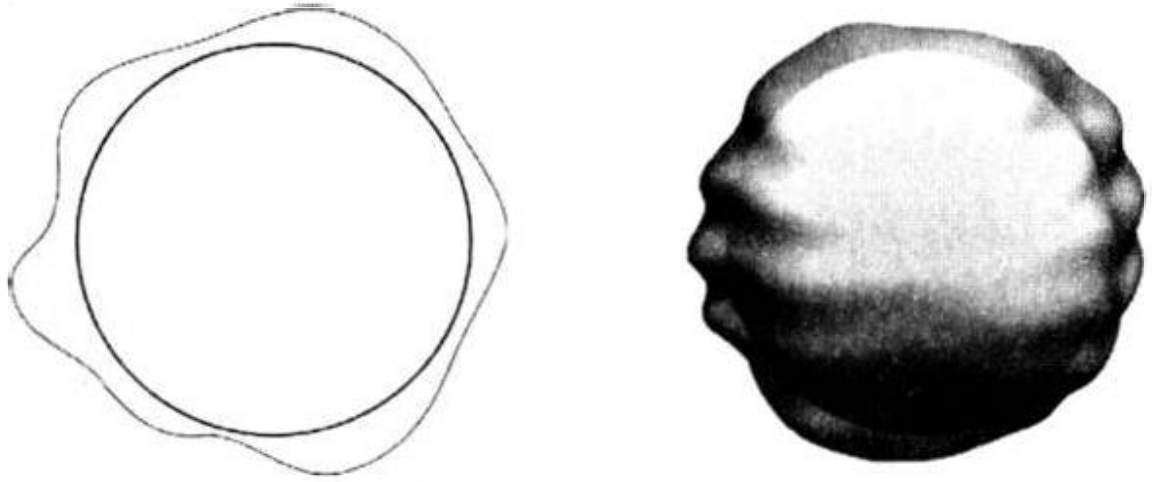
---

tenzorsko polje $B_{\mu\nu}$ – realni dio kompleksne Kählerove forme na zrcalnom Calabi-Yauovom prostoru – iščezne, a to je još drastičnija vrsta singularnosti od one o kojoj smo govorili u poglavlju 11.

Slijedeći ranije avangardne radove Wittena i Seiberga, Strominger je iskoristio spoznaju da teorija struna, kada je se analizira novom preciznošću druge revolucije superstruna, nije samo teorija jednodimenzionalnih struna. Evo kako je razmišljao: jednodimenzionalna struna – jednobrana, rečeno novijim jezikom struke – može u potpunosti okružiti jednodimenzionalni komadić prostora, poput kruga, što smo ilustrirali slikom 13.1. (Uočimo da se ona razlikuje od slike 11.6, na kojoj jednodimenzionalna struna, gibajući se kroz vrijeme, okružuje dvodimenzionalnu sferu. Sliku 13.1 treba vidjeti kao snimku jednog trenutka.) Slično tome, na slici 13.1 vidimo da dvodimenzionalna membrana – dvobrana – može omotati i u potpunosti prekriti dvodimenzionalnu sferu, otprilike kao što se plastičnom folijom može omotati površina naranče. Iako je to teže vizualizirati, Strominger je slijedio taj obrazac i shvatio da novootkriveni trodimenzionalni sastojci u teoriji struna – trobrane – mogu omotati i u potpunosti prekriti trodimenzionalnu sferu.

Strominger je sve to jasno shvatio i tada dokazao, jednostavnim i standardnim fizikalnim proračunom, da omotana trobrana pruža kao po mjeri izrađen štit koji upravo poništava sve potencijalno kataklizmičke posljedice od kojih su teoretičari struna prije strahovali ako bi se trodimenzionalna sfera urušila.

To je bila čudesna i veoma važna spoznaja. No njezina puna snaga pokazala se tek nešto kasnije.



Slika 13.1 Struna može okružiti jednodimenzionalni uvijeni komad tkiva prostora; dvodimenzionalna membrana može omotati dvodimenzionalni komad.

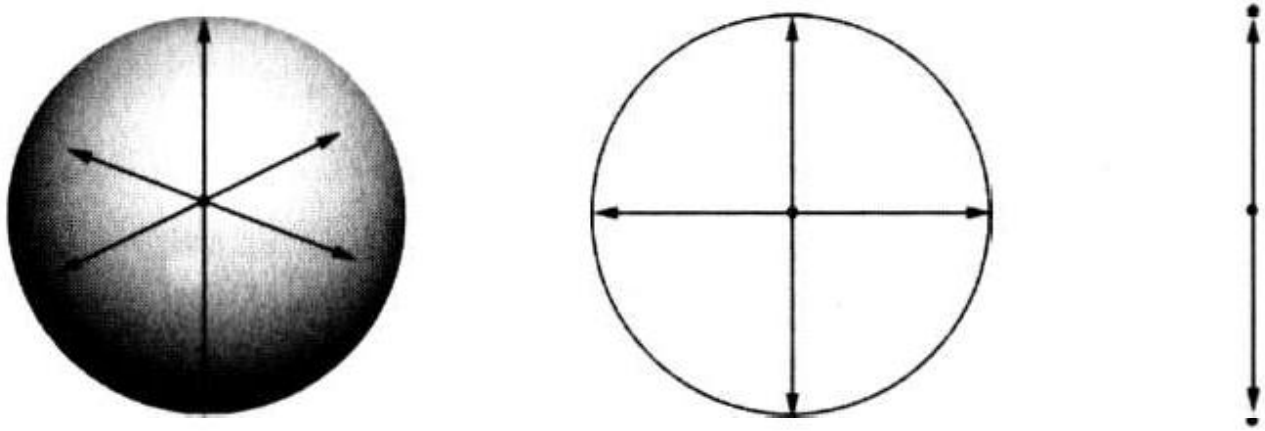
Cijepanje tkiva prostora – s uvjerenjem

Jedna od najuzbudljivijih stvari u vezi s fizikom jest kako se stanje znanja može promijeniti doslovno preko noći. Jutro nakon što je Strominger objavio svoj članak u elektroničkoj arhivi na internetu, pročitao sam ga u svom uredu u Cornellu, nakon što sam ga skinuo s World Wide Weba. Strominger je jednim udarcem iskoristio te nove, uzbudljive spoznaje teorije struna kako bi riješio jedno od najtežih pitanja o uvijanju dodatnih dimenzija u Calabi-Yauov prostor. No dok sam razmišljao o njegovu članku, shvatio sam da je razradio samo pola priče.

U ranijem radu o inverznom prijelazu s cijepanjem prostora, opisanom u poglavlju 11, proučili smo dvodijelni proces u kojemu se dvodimenzionalna sfera smanjuje u točku i prouzroči cijepanje tkiva prostora, a zatim dvodimenzionalna sfera naraste na nov način i tako zatvori prorez. Strominger je u svom članku proučio što se događa kad se

trodimenzionalna sfera smanji u točku, i dokazao da novopronađeni protežni objekti u teoriji struna osiguravaju da se fizika i dalje savršeno lijepo ponaša. Ali, tu njegov članak završava. Bi li moglo biti da postoji i druga polovica priče, koja opet uključuje cijepanje prostora i njegovo "krpanje" ponovnim širenjem sfera?

U ljetnom semestru 1995. posjetio me je Dave Morrison i jednoga popodneva raspravljali smo o Stromingerovom članku. Nakon dva sata imali smo nacrt kako bi "druga polovica priče" mogla izgledati. Oslanjajući se na neke spoznaje s kraja 1980-ih do kojih su došli matematičari Herb Clemens sa sveučilišta države Utah, Robert Friedman sa sveučilišta Columbia i Miles Reid sa sveučilišta Warwick, a primijenili su ih Candelas, Green i Tristan Hübsch, tada na sveučilištu države Texas u Austinu, shvatili smo da, kad se uruši trodimenzionalna sfera, možda bi se Calabi-Yauov prostor mogao pocijepati i zatim se zakrpati napuhavanjem sfere. No,



Slika 13.2 Sfere u dimenzijama koje se lako može vizualizirati – od (a) dvije, (b) jedne i (c) nula dimenzija.

tu se krije važno iznenađenje. Iako je urušena sfera imala tri dimenzije, ona koja se napuše ima samo *dvije*. Teško je zamisliti kako to izgleda, ali neki pojam o tome možemo steći pogledom na nižedimenzionalnu analogiju. Umjesto teško predočivog slučaja trodimenzionalne sfere koja se urušava i zamjenjuje je dvodimenzionalna sfera, zamislimo da se urušava *jedno*dimenzionalna sfera, a zamjenjuje je sfera *bez* dimenzija – nuldimenzionalna sfera.

Prije svega, što su jednodimenzionalna sfera i sfera bez

dimenzija? Poslužimo se analogijom. Dvodimenzionalna sfera je skup točaka u trodimenzionalnom prostoru koje su na jednakoj udaljenosti od odabranog središta, kao što je prikazano na slici 13.2(a). Po istom načelu, jednodimenzionalna sfera je skup točaka u dvodimenzionalnom prostoru (na primjer, površini stranice) koje su na jednakoj udaljenosti od odabranog središta. Kao što je prikazano na slici 13.2(b), to nije ništa drugo nego kružnica. Na kraju, slijedimo li tu logiku, nuldimenzionalna sfera je skup točaka u jednodimenzionalnom prostoru (crti) koje su na jednakoj udaljenosti od odabranog središta. Kao što je prikazano na slici 13.2(c), to su samo *dvije točke*, a "polumjer" nuldimenzionalne sfere jednak je udaljenosti tih točaka od njihova središta. Dakle, nižedimenzionalna analogija iz prethodnog odlomka uključuje kružnicu (jednodimenzionalnu sferu) koja se urušava, slijedi kidanje prostora, i zamjenjuje je sfera bez dimenzija (dvije točke). Slika 13.3 prikazuje tu apstraktnu ideju u praksi.

Slika 13.3 Kružni dio uštipka (torus) urušava se u točku. U površini se otvara prorez s dvjema rupama. Sfera nulte dimenzije (dvije točke) se "nalijepi" i zamijeni prvotnu jednodimenzionalnu sferu (kružnicu) i zakrpa pocijepanu površinu. To omogućuje transformaciju u posve drukčiji oblik – loptu.

Zamišljamo da počinjemo s površinom uštipka, u kojoj je utjelovljena jednodimenzionalna sfera (krug), što je istaknuto na slici 13.3. Sada zamislimo da s prolaskom vremena istaknuti krug urušava i prouzroči cijepanje tkiva prostora. To možemo zakrpati tako da dopustimo da se tkivo trenutno pocijepa a tada pocijepanu jednodimenzionalnu sferu – urušenu kružnicu – zamijenimo nuldimenzionalnom sferom – dvjema točkama – tako što ćemo izdupsti rupe u gornjem i donjem dijelu oblika koji je nastao cijepanjem. Kako

je prikazano na slici 13.3, tako nastali oblik izgleda poput izobličene banane, koja se blagim deformiranjem (bez cijepanja prostora) može lako preoblikovati u površinu lopte. Dakle, vidimo da, kad se jednodimenzionalna sfera uruši i zamijeni je nuldimenzionalna sfera, topologija prvotnog uštipka, to jest njegov osnovni oblik, drastično se mijenja. U kontekstu uvijenih prostornih dimenzija, proces cijepanja prostora na slici 13.3 rezultirao bi time da se svemir prikazan na slici 8.8 razvija u onaj sa slike 8.7.

Iako je to nižedimenzionalna analogija, ona izražava bitne značajke onoga što smo Morrison i ja predvidjeli kao drugu polovicu Stromingerove priče. Nakon urušavanja trodimenzionalne sfere unutar Calabi-Yauova prostora, činilo nam se da se prostor može pocijepati i potom se zakrpati stvaranjem dvodimenzionalne sfere, što vodi do daleko drastičnijih promjena u topologiji nego što smo ih Witten i mi našli u svom ranijem radu (raspravljenom u poglavlju 11). Tako bi se neki Calabi-Yauov prostor mogao, u biti,

transformirati u posve drukčiji Calabi-Yauov prostor – otprilike kao što se uštipak pretvara u loptu na slici 13.3 – pri čemu se fizika struna savršeno lijepo ponaša. Iako se počela nazirati cijela slika, znali smo da ima važnih aspekata koje trebamo proraditi kako bismo ustanovili da naša druga polovica priče ne uvodi nikakve singularnosti – to jest, štetne i fizikalno neprihvatljive posljedice. Te večeri otišli smo kući naslućujući da smo na rubu velikog otkrića.

Navala elektroničke pošte

Sljedeće jutro dobio sam e-mail od Stromingera u kojemu me je upitao ima li komentara ili reakcija na njegov članak. Spomenuo je da bi se "nekako trebao povezati s tvojim radom s Aspinwallom i Morrisonom" jer, kako se pokazalo, i on je istraživao moguću povezanost s pojavom topološke promjene. Odmah sam mu poslao e-mail s grubim opisom

onoga do čega smo došli Morrison i ja. Kad je odgovorio, bilo je jasno da je uzbuđen kao što smo Morrison i ja bili uzbuđeni dan prije.

Sljedećih dana između nas trojice tekla je neprekidna struja elektroničke pošte. Pokušavali smo svoju zamisao o drastičnoj topološkoj promjeni s cijepanjem prostora izraziti s kvantitativnom strogošću. Polako ali sigurno, sve pojedinosti sjele su na svoje mjesto. Sljedeće srijede, tjedan dana nakon što je Strominger objavio svoje početno otkriće, imali smo nacrt zajedničkog članka o toj dramatičnoj transformaciji tkiva prostora koja može slijediti nakon urušavanja trodimenzionalne sfere.

Strominger je sutradan trebao održati seminar na Harvardu i zato je rano ujutro otputovao iz Santa Barbare. Dogovorili smo se da ćemo Morrison i ja i dalje dorađivati članak te ga te večeri unijeti u elektroničku arhivu. Do 23.45 provjerili smo svoje izračune i činilo se da se sve savršeno

uklapa. Stoga smo unijeli članak u arhivu i izašli iz zgrade Odsjeka za fiziku. Dok smo Morrison i ja hodali prema mom automobilu (trebao sam ga odvesti do kuće koju je bio unajmio za taj semestar), počeli smo voditi raspravu sa stajališta đavoljeg odvjetnika, u kojoj smo predviđali kakve bi mogle biti najstrože kritike koje bi nam mogao uputiti onaj tko nikako ne želi prihvatiti naše rezultate. Kad smo već bili izašli iz kampusa, shvatili smo da naši argumenti nisu posve neprobojni, iako su jaki i uvjerljivi. Nijedan od nas nije mislio da postoje stvarni izgledi da je naš rad promašen, ali shvatili smo da odlučnost s kojom smo izrazili svoje tvrdnje i konkretne formulacije koje smo odabrali na nekim mjestima ostavljaju prostora za žučnu raspravu koja bi mogla prikriti važnost naših rezultata. Složili smo se da bi bilo bolje da smo članak napisali u mirnijem tonu, da smo tvrdnje iznijeli manje radikalno i dopustili zajednici fizičara da ocijeni naš rad samo po njegovoj vrijednosti, umjesto da možda reagira na oblik u kojem smo ga predstavili.

Dok smo se vozili, Morrison me je podsjetio da pravila elektronske arhive omogućuju da članak revidiramo do 2.00, i tada će biti dostupan javnosti na internetu. Odmah sam stao i okrenuo automobil pa smo se vratili na fizikalni odsjek, povukli svoj prvi članak i počeli raditi na blažoj verziji teksta. Srećom, to nije bilo teško. Izmijenili smo nekoliko riječi u ključnim odlomcima te tako ublažili svoje tvrdnje, a stručni sadržaj ostao je isti. Nakon sat vremena ponovno smo unijeli članak u arhivu i složili se da te noći više uopće nećemo razgovarati o njemu.

Sutra poslijepodne bilo je već jasno da su reakcije na naš članak pune oduševljenja. Među mnogim porukama u elektroničkoj pošti bio je i Plesserov odgovor kao jedan od najvećih komplimenata koje fizičar može dati drugom fizičaru: "Da sam se barem ja toga sjetio! " Bez obzira na naše strahove od prethodne noći, uvjerili smo zajednicu teoretičara struna da tkivo prostora može biti podvrgnuto ne samo

blagim urezima koje smo otkrili prije (poglavlje 11), nego i drastičnom cijepanju, ilustriranom na slici 13.3

Vratimo se crnim rupama i elementarnim česticama

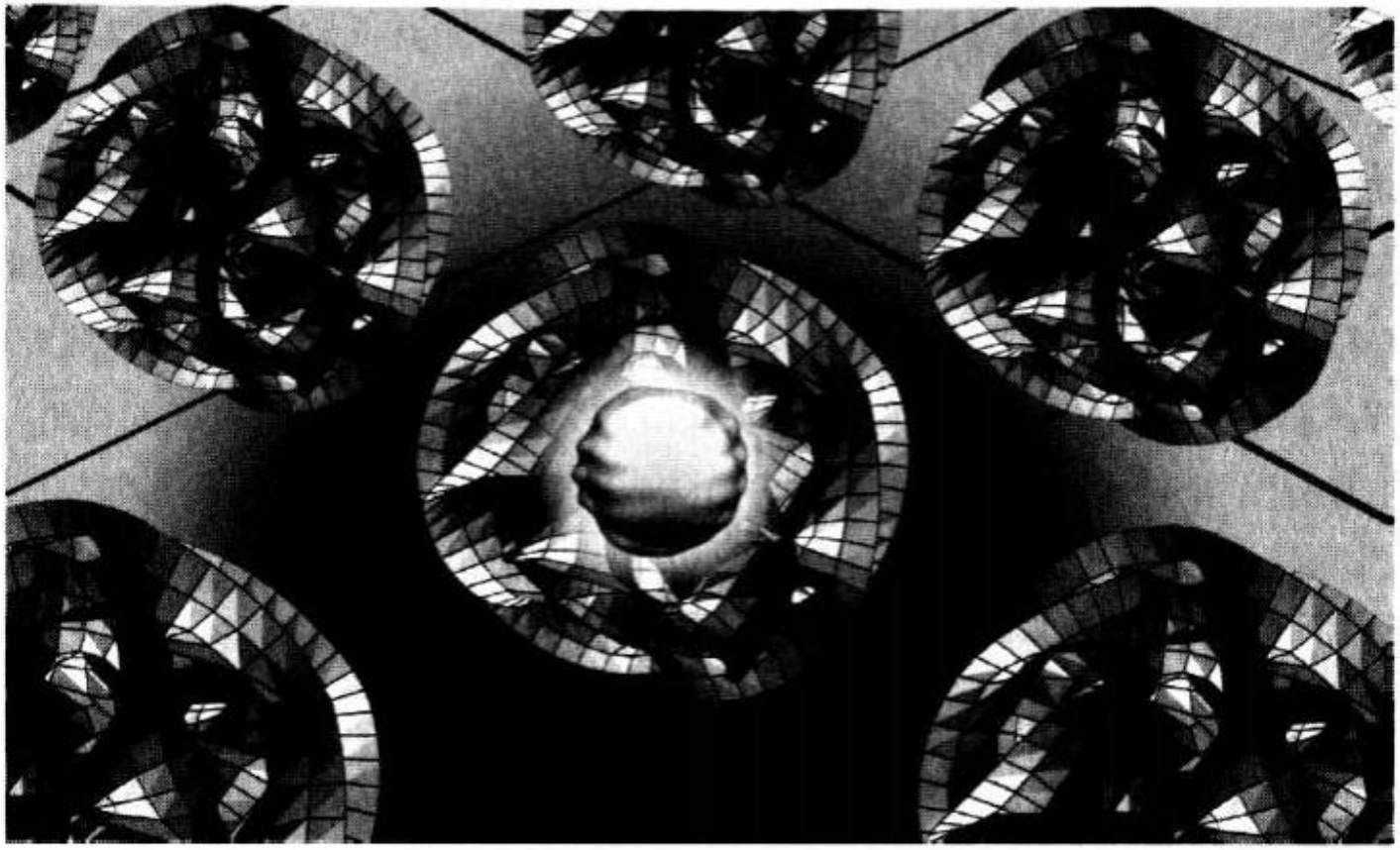
Kakve to ima veze s crnim rupama i elementarnim česticama? Ima veze. Da bismo to vidjeli, moramo se zapitati isto pitanje koje smo postavili u poglavlju 11. Koje su fizikalne posljedice takvih cijepanja tkiva prostora? Za inverzne prijelaze, kao što smo vidjeli, iznenađujući odgovor na to pitanje glasi da se uopće ne događa puno toga. Za konifoldne prijelaze – stručno ime za drastične prijelaze s cijepanjem prostora koje smo pronašli – opet nema nikakve fizikalne katastrofe (kakve bi bilo u konvencionalnoj općoj teoriji relativnosti), ali ima vidljivih empirijskih posljedica.

U osnovi tih empirijskih posljedica su dva pojma; objasnit ćemo ih jedan po jedan. Prvo, kao što smo već rekli,

početno Stromingerovo otkriće bilo je njegova spoznaja da se trodimenzionalna sfera unutar Calabi-Yauovog prostora može urušiti a da ne uslijedi nikakva katastrofa, jer trobrana omotana oko nje pruža savršen štit. Kako izgleda ta konfiguracija s omotanom membranom? Odgovor ćemo pronaći u ranijem radu Horowitza i Stromingera, koji je pokazao da za osobe poput nas, koji izravno poznajemo samo tri protežne prostorne dimenzije, trobrana "razmazana" po trodimenzionalnoj sferi postavit će gravitacijsko polje koje izgleda poput gravitacijskog polja crne rupe.[2] To *nije* očito i postaje jasno tek detaljnim proučavanjem jednadžbi koje upravljaju membranama. Ponovno, teško je nacrtati takve višedimenzionalne konfiguracije, ali približno ih prikazuje

---

[2] Preciznije govoreći, to su primjeri *ekstremnih* crnih rupa: onih koje imaju minimalnu masu konzistentnu s nabojima sila koje nose, upravo poput BPS-stanja u poglavlju 12. Slične crne rupe igrat će i glavnu ulogu u raspravi o entropiji crnih rupa koja slijedi.



Slika 13.4 Kad se brana omota oko sfere koja je unutar uvijenih dimenzija, ona se u poznatim nam protežnim dimenzijama pojavljuje kao crna rupa.

slika 13.4, kao nižedimenzionalna analogija s dvodimenzionalnim sferama. Vidimo da se dvodimenzionalna membrana može omotati oko dvodimenzionalne sfere (koja je i

sama smještena unutar Calabi-Yauovog prostora postavljenog negdje u protežnim dimenzijama). Netko tko gleda kroz protežne dimenzije prema tome mjestu osjetit će omotanu membranu po njezinoj masi i nabojima sila koje prenosi, što su svojstva za koja su Horowitz i Strominger pokazali da će izgledati upravo poput svojstava crne rupe. Štoviše, Strominger je u svom važnom radu iz 1995. ustvrdio da je masa trobrane – to jest, masa crne rupe – proporcionalna obujmu trodimenzionalne sfere koju omotava: što je veći obujam sfere, to veća mora biti trobrana kako bi je omotala, i to ona postaje masivnija. Slično tome, što je manji obujam sfere, to je manja masa trobrane koja je omotava. Kad se ta sfera uruši, trobrana koja se omota oko sfere, koja se percipira kao crna rupa, postaje još lakša. Kad se trodimenzionalna sfera uruši u točku, odgovarajuća crna rupa – pripremite se – uopće nema masu. Iako to zvuči tajanstveno – kako crna rupa može nemati masu? – ubrzo ćemo povezati tu zagonetku s poznatom nam fizikom struna.

Moramo se prisjetiti i da broj rupa u Calabi-Yauovom prostoru, kao što smo raspravili u poglavlju 9, određuje broj niskoenergijskih vibracijskih uzoraka struna, dakle i male mase, modela koji bi mogli objasniti čestice i naboje sila iz tablice 1.1. Budući da konifoldni prijelazi s cijepanjem prostora mijenjaju broj rupa (kao na primjer na slici 13.3, na kojoj se rupa u torusu uklanja procesom cijepanja/krpanja), očekujemo promjenu u broju vibracijskih modela male mase. I doista, kad smo to Morrison, Strominger i ja dobro proučili, zaključili smo da, kad nova dvodimenzionalna sfera zamjenjuje urušenu trodimenzionalnu sferu u uvijenim Calabi-Yau dimenzijama, broj vibracijskih uzoraka bez mase povećava se točno za jedan. (Primjer uštipka koji se na slici 13.3 pretvara u loptu naveo bi vas na vjerovanje da se broj rupa – a stoga i broj uzoraka – smanjuje, ali to je mana te nižedimenzionalne analogije.)

Da bismo kombinirali opažanja iz prethodna dva odlomka, zamislimo niz fotografija Calabi-Yauovog prostora na

ka, zamislimo niz fotografija Calabi-Yauovog prostora na kojima se veličina trodimenzionalne sfere smanjuje. Prvo saznanje znači da trobrana omotana oko te trodimenzionalne sfere – koju vidimo kao crnu rupu – ima sve manju masu, sve dok je u završnom trenutku urušavanja potpuno ne izgubi. No, kao što smo se gore zapitali, što to znači? Odgovor će nam postati jasan kad se prisjetimo drugog saznanja. Naš rad dokazao je da je nov model titranja struna koji nastaje konifoldnim prijelazom bez mase zapravo mikroskopski opis čestice bez mase u koju se crna rupa pretvorila. Zaključili smo da, kad Calabi-Yauov prostor prolazi kroz konifoldni prijelaz s cijepanjem prostora, masivna crna rupa postaje sve lakša sve dok ne izgubi svu masu i pretvori se u česticu bez mase – poput fotona – koji u teoriji struna nije ništa drugo nego jedna struna koja titra u skladu s osobitim vibracijskim uzorkom. Na taj način, teorija struna prvi put eksplicitno uspostavlja izravnu, konkretnu i neporecivu kvantitativnu vezu između crnih rupa i elementarnih čestica.

"Otapanje" crnih rupa

Povezanost između crnih rupa i elementarnih čestica koju smo pronašli srodna je nečemu što poznajemo u svakodnevici, a stručno se naziva promjenom agregatnog stanja. Jednostavan primjer promjene agregatnog stanja spomenuli smo u prethodnom poglavlju: voda može postojati kao krutina (led), kao tekućina (tekuća voda) i kao plin (vodena para). To su *agregatna stanja* vode, a prijelaz iz jednoga u drugog naziva se i *faznim prijelazom*. Morrison, Strominger i ja dokazali smo da postoji stroga matematička i fizikalna analogija između tih faznih prijelaza i konifoldnih prijelaza s cijepanjem prostora iz jednog Calabi-Yauovog oblika u drugi. I opet, kao što onaj tko nikad nije naišao na tekuću vodu ili kruti led ne bi odmah shvatio da su to dva agregatna stanja iste tvari, fizičari prije nisu shvaćali da su one crne rupe koje smo proučavali i elementarne čestice zapravo dva agregatna stanja iste strunaste tvari. Dok okolna temperatu-

ra određuje agregatno stanje u kojem se nalazi voda, topološka forma – oblik – dodatnih Calabi-Yauovih dimenzija određuje hoće li se određene fizikalne konfiguracije u teoriji struna pojaviti kao crne rupe ili elementarne čestice. Naime, u prvoj fazi, početni Calabi-Yauov oblik (recimo, analogon agregatnog stanja leda), vidimo da postoje određene crne rupe. U drugoj fazi, drugom Calabi-Yauovom obliku (analogonu agregatnog stanja tekuće vode), te crne rupe prošle su kroz fazni prijelaz – takoreći, "otopile" su se – u temeljne vibracijske modele struna. Cijepanje prostora konifoldnim prijelazima vodi nas od jedne Calabi-Yauove faze do druge. Tako vidimo da su crne rupe i elementarne čestice, poput vode i leda, dvije strane iste medalje. Vidimo da se crne rupe izvrsno uklapaju u okvir teorije struna.

Svjesno smo se poslužili istom analogijom vode za te drastične transmutacije s cijepanjem prostora i za transmutacije iz jedne od pet formulacija teorije struna u drugu (poglavlje

12) jer su one blisko povezane. Prisjetimo se da smo slikom 12.11 izrazili da su pet teorija struna dvojne jedna u odnosu na drugu i stoga su ujedinjene pod egidom jedne, obuhvatne teorije. No, da li sposobnost stalnog prelaženja iz jednog opisa u drugi – isplovljavanja iz bilo koje točke na karti na slici 12.11 i doplovljavanja do bilo koje druge – opstaje čak i kad dopustimo da se u ovaj ili onaj Calabi-Yauov prostor uviju dodatne dimenzije? Prije otkrića drastičnih posljedica promjene topologije, očekivani odgovor bio je negativan, jer nitko nije znao kako neprekidno deformirati jedan Calabi-Yauov oblik u svaki drugi. No danas vidimo da je odgovor pozitivan: tim fizikalno razumnim konifoldnim prijelazima možemo trajno mijenjati svaki Calabi-Yauov prostor u svaki drugi. Varirajući konstante reakcije struna i uvijenu Calabi-Yauovu geometriju, opet vidimo da su sve konstrukcije struna različita agregatna stanja jedinstvene teorije. Čak i nakon uvijanja dodatnih dimenzija, jedinstvo na slici 12.11 ostaje postojano.

ostaje postojano.

Entropija crne rupe

Neki od najuglednijih teorijskih fizičara godinama su spekulirali o mogućnosti procesa s cijepanjem prostora i o povezanosti crnih rupa s elementarnim česticama. Iako su takve spekulacije isprva zvučale poput znanstvene fantastike, otkriće teorije struna, i njezina sposobnost ujedinjavanja opće teorije relativnosti i kvantne mehanike, danas nam dopušta da te mogućnosti shvatimo kao glavne teme najsuvremenije znanosti. Taj uspjeh potiče nas da se zapitamo bi li i neka druga tajanstvena svojstva našeg svemira koja desetljećima tvrdoglavo izmiču objašnjenju također mogla pokleknuti pred snagom teorije struna. Prvo među njima je pojam *entropije crne rupe*. To je arena u kojoj je teorija struna pokazala mišiće i uspješno riješila četvrt stoljeća star problem od velike važnosti.

Entropija je mjera nereda ili slučaja. Na primjer, ako vam je radni stol pretrpan slojevima otvorenih knjiga, polupročitanih članaka, starih novina i reklamnih letaka, on je u stanju velikog nereda, ili *visoke entropije*. S druge strane, ako je dobro organiziran, s abecedno poredanim člancima, novinama uredno složenim po datumu, knjigama razvrstanim po autoru, i olovkama u čašama, vaš stol je stanju visokog reda, ili niske entropije. Taj primjer ilustrira glavnu ideju, ali fizičari daju kvantitativnu definiciju entropije koja omogućuje da se nečija entropija opiše konkretnom brojčanom vrijednošću: veći broj znači veću entropiju, a manji broj manju. Premda su detalji takvog izračuna prilično zamršeni, pojednostavljeno rečeno, taj broj izražava broj mogućih rasporeda sastojaka danog fizikalnog sustava koji ne mijenjaju njegov opći izgled. Kad vam je stol uredan i čist, gotovo svaka promjena rasporeda – promjena poretka novina, knjiga ili članaka, vađenje olovaka iz čaše – poremetit će njegovu urednu organizaciju. Tako se objašnjava njegova niska en-

tropija. Suprotno tome, kad vam je stol u neredu, ostat će u neredu i nakon mnogih promjena u rasporedu novina, članaka i smeća, te se njegov ukupan izgled neće promijeniti. Tako se objašnjava njegova visoka entropija.

Naravno, taj opis preraspoređivanja knjiga, članaka i novina na radnom stolu – i procjenjivanje nakon kojeg preraspoređivanja "opći izgled ostaje netaknut" – nije znanstveno precizan. Stroga definicija entropije zapravo uključuje brojanje ili izračunavanje broja mogućih rasporeda mikroskopskih kvantnomehaničkih svojstava elementarnih konstituenata fizikalnog sustava koji ne utječu na njegova makroskopska svojstva (kao što je njegova energija ili tlak). Pojedinosti nisu važne: glavno je da shvaćamo da je entropija u potpunosti kvantitativan kvantnomehanički pojam koji precizno mjeri ukupan nered fizikalnog sustava.

Jakob Bekenstein, student Johna Wheelera, 1970. je iznio odvažan prijedlog. Izložio je zamisao da bi crne rupe mogle

imati entropiju – i to u golemim količinama. Bekensteina je potaknuo slavni i dobro provjereni drugi zakon termodinamike, koji glasi da se entropija sustava uvijek povećava: sve teži prema stanju većeg nereda. Čak i ako očistite svoj pretrpani stol i smanjite mu entropiju, ukupna entropija, uključujući i entropiju vašeg tijela i zraka u sobi, zapravo će se povećati. Vidite, kako biste očistili stol, morate potrošiti energiju; morate poremetiti neke uredne molekule masti u svom tijelu kako biste prenijeli energiju u mišiće, a dok čistite, tijelo vam ispušta toplinu koja uzvitlava molekule okolnog zraka i prenosi ih u stanje veće pobuđenosti i nereda. Kad se uračunaju sve te posljedice, one i više nego nadoknađuju smanjenje entropije na vašem stolu, i tako se ukupna entropija povećava.

No, Bekenstein je zapravo postavio pitanje što se događa kad čistite stol u blizini horizonta događaja crne rupe i usisačem usišete sve uzvitlane molekule zraka iz jedne sobe i ispušete ih u unutrašnjost crne rupe? Možemo dati i ekstre-

ispuste li u unutrašnjost crne rupe? Možemo dati i ekstremniji primjer: što ako usisivač u crnu rupu upuše ne samo zrak, nego i sav sadržaj stola, pa čak i sam stol, te vam ostavi samo hladnu, potpuno urednu sobu? Budući da se entropija u sobi zasigurno smanjila, Bekenstein je zaključio da bi jedini način da se zadovolji drugi zakon termodinamike bio da crna rupa ima entropiju, i da ta se entropija dovoljno poveća kako se materija unosi u crnu rupu, kako bi se nadoknadilo promatrano smanjenje entropije izvan crne rupe.

Zapravo, Bekenstein se oslanjao na slavni rezultat Stephena Hawkinga. Hawking je dokazao da se područje horizonta događaja crne rupe – prisjetimo se, to je površina koja okružuje crnu rupu, a iza koje nema povratka – uvijek povećava u svakoj fizikalnoj interakciji. Hawking je dokazao da, ako u crnu rupu padne asteroid ili plin s površine obližnje zvijezde, ili ako se dvije crne rupe sudare i stope – u svim tim procesima, a i u svim drugim, ukupno područje horizonta događaja uvijek se povećava. Prema Bekensteinu,

to neumoljivo povećavanje ukupnog područja naznačuje vezu s neumoljivim razvojem prema većoj ukupnoj entropiji, utjelovljenim u drugom zakonu termodinamike. Bekenstein je iznio tvrdnju da površina horizonta događaja crne rupe pruža preciznu mjeru njezine entropije.

No nakon detaljnije analize nalazimo dva razloga zašto fizičari većinom misle da Bekensteinova ideja ne može biti točna. Prvo, činilo bi se da su crne rupe među najurednijim i najorganiziranijim predmetima u cijelom svemiru. Kad izmjerimo masu crne rupe, naboje sila koje nosi i njezin spin, precizno smo odredili njezin identitet. Uz tako malo odrednica, čini se da crnoj rupi nedostaje strukture koja bi uopće omogućila nered. Kao što se baš i ne može napraviti mnogo nereda na stolu na kojem je samo jedna knjiga i olovka, tako su i crne rupe previše jednostavne da bi uopće omogućile nastanak nereda. Drugi razlog zašto je bilo teško prihvatiti Bekensteinovu tvrdnju glasi da je entropija, kao što smo već rekli, kvantnomehanički pojam, dok su crne rupe sve done-

davno bile čvrsto utvrđene u neprijateljskom taboru klasične opće teorije relativnosti. Početkom 1970-ih, kada se nije moglo povezati opću relativnost s kvantnom mehanikom, rasprava o mogućoj entropiji crne rupe doimala se u najboljem slučaju neobičnom idejom.

Koliko je crno crno?

Pokazalo se da se i Hawking dosjetio analogije između svog zakona o povećanju površine crne rupe i zakona o neumoljivom porastu entropije, ali odbacio ju je kao puku koincidenciju. Uostalom, rezonirao je Hawking, na osnovi svog zakona o porastu površine i ostalih rezultata do kojih je došao s Jamesom Bardeenom i Brandonom Carterom, ako se analogija između zakona crnih rupa i zakona termodinamike ozbiljno shvati, tada ne samo da bismo bili prisiljeni

identificirati površinu horizonta događaja crne rupe s entropijom nego se pokazuje da bismo crnoj rupi morali pripisati i *temperaturu* (čiju bi preciznu vrijednost određivala snaga gravitacijskog polja crne rupe na horizontu događaja). No ako crna rupa ima temperaturu različitu od nule – koliko god malenu – onda osnovni i provjereni fizikalni principi *zahtijevaju* da ona emitira zračenje, poput užarene šipke. No, kao što svi znaju, crna rupa je crna: ona navodno ne emitira ništa. Hawking i gotovo svi drugi složili su se da to definitivno isključuje Bekensteinov prijedlog. Umjesto toga, Hawking je bio spreman prihvatiti da, ako materija koja nosi entropiju upadne u crnu rupu, ta se entropija jednostavno izgubi. Toliko što se tiče drugog zakona termodinamike.

Tako je bilo sve do 1974, kad je Hawking otkrio nešto doista iznenađujuće. Objavio je da crne rupe nisu *posve* crne. Ako zanemarimo kvantnu mehaniku i uzmemo u obzir samo zakone klasične opće relativnosti, onda, kao što je bilo poznato već šezdesetak godina, crne rupe zasigurno ne do-

puštaju da ništa – pa ni svjetlost – pobjegne iz njihova gravitacijskog stiska. No, uključenje kvantne mehanike bitno mijenja taj zaključak. Premda nije imao kvantnomehaničku verziju opće relativnosti, Hawking je uspio izvesti osobito jedinstvo tih dvaju teorijskih alata koje je pružilo neke ograničene, ali pouzdane rezultate. A najvažniji njegov rezultat glasio je da crne rupe *ipak* emitiraju zračenje, kvantnomehanički.

Izračuni su dugotrajni i teški, ali Hawkingova osnovna zamisao je jednostavna. Vidjeli smo da nam načelo neodređenosti kaže da je čak i vakuum praznog prostora prava groznica virtualnih čestica koje trenutno nastanu i odmah se međusobno anihiliraju. To skokovito kvantno ponašanje pojavljuje se u prostoru tik izvan horizonta događaja crne rupe. No Hawking je shvatio da gravitacijska snaga crne rupe može ubrizgati energiju u par virtualnih fotona, energiju koja ih razdvoji upravo toliko da jedan od njih bude

usisan u crnu rupu. Kad njegov partner nestane u ponoru rupe, drugi foton iz para više nema partnera s kojim bi se anihilirao. Hawking je dokazao da preostali foton dobije energiju od gravitacijske sile crne rupe, i dok njegov partner pada u nju, on dobiva udarac energije i udaljava se od nje. Hawking je shvatio da bi kombinirani efekt tog cijepanja virtualnog fotonskog para, do kojeg dolazi po cijelom horizontu događaja crne rupe, onome tko promatra crnu rupu izdaleka izgledao kao postojana struja zračenja. Crne rupe *svjetlucaju*.

Štoviše, Hawking je uspio izračunati temperaturu koju bi udaljeni promatrač asocirao s emitiranim zračenjem i pronašao da ju daje snaga gravitacijskog polja na horizontu crne rupe, upravo kao što sugerira analogija između fizike crne rupe i zakona termodinamike.[3] Bekenstein je imao pravo: Hawkingovi rezultati pokazali su da je to mnogo više nego analogija: to je *identitet*. Crna rupa ima entropiju. Crna rupa ima temperaturu. A gravitacijski zakoni fizike

crne rupe nisu ništa drugo nego verzija zakona termodinamike u krajnje egzotičnom gravitacijskom kontekstu. To je bila Hawkingova bomba 1974.

Da bismo dobili dojam o kojim razmjerima je riječ, pokazuje se da, kad oprezno uzmemo u obzir sve pojedinosti, crna rupa čija masa je triput veća od mase Sunca ima temperaturu od oko stotinke milijuntinke stupnja iznad apsolutne nule. Dakle, ne baš nula stupnjeva, ali blizu. Crne rupe nisu crne, ali gotovo da jesu. Na žalost, zbog toga je emitirano zračenje crne rupe slabo i ne možemo ga empirijski detektirati. Međutim, postoji iznimka. Hawkingovi izračuni pokazali su i da, što je crna rupa manje masivna, to je njezina temperatura viša i ona emitira više zračenja. Na primjer, crna rupa lagana poput malenog asteroida emitirala bi ko-

---

[3] Zračenje koje emitira crna rupa trebalo bi biti upravo poput onog koje emitira vruća pećnica – isti taj problem, izložen na početku poglavlja 4, igrao je glavnu ulogu u razvoju kvantne mehanike.

ličinu zračenja kao i vodikova bomba od milijun megatona, pri čemu bi zračenje bilo koncentrirano u području gama-zraka u elektromagnetskom spektru. Astronomi pretražuju noćno nebo u potrazi za takvim zračenjem, ali osim nekoliko lažnih uzbuna, zasad ostaju praznih ruku, što je naznaka da su crne rupe tako male mase vrlo rijetke, ako uopće postoje.[4] Kako Hawking često ističe u šali, to je baš šteta, jer kad bi se otkrilo zračenje crnih rupa koje njegov rad predviđa, on bi zasigurno dobio Nobelovu nagradu.[5]

Za razliku od tako niske temperature, niže od milijuntinke stupnja, kad izračunamo entropiju, recimo, crne rupe triput masivnije od Sunca, rezultat je apsolutno golem broj: jedinica s 78 nula! Što je crna rupa masivnija, entropija je veća. Uspjeh Hawkingovih izračuna nedvosmisleno je ustanovio da to uistinu odražava golemu količinu nereda koju utjelovljuje crna rupa.

Ali, što je to u neredu? Kao što smo vidjeli, čini se da su crne rupe vrlo jednostavni objekti – pa gdje je onda izvor

sveg tog nereda? Hawkingovi proračuni ništa nam nisu rekli o tom pitanju. Njegovo osobito spajanje opće teorije relativnosti s kvantnom mehanikom moglo bi se iskoristiti da bi se odredila brojčana vrijednost entropije crne rupe, ali ništa nam ne govori o njezinom mikroskopskom značenju. Neki od najvećih fizičara su više od četvrt stoljeća pokušavali odrediti koja bi moguća mikroskopska svojstva crnih rupa mogla objasniti njihovu entropiju. No, bez doista pouzdanog amalgama kvantne mehanike i opće teorije relativnosti, možda tek naziremo odgovor, ali tajna ostaje neotkrivena.

---

4 Pokazalo se da, zato što su crne rupe koje sudjeluju u konifoldnim prijelazima s cijepanjem prostora ekstremne, one ne emitiraju Hawkingovo zračenje, bez obzira na to koliko su lagane postale.

5 Stephen Hawking, predavanje na Amsterdamskom simpoziju o gravitaciji, crnim rupama i strunama, 21. lipnja 1996.

Ili je stupila u siječnju 1996, kad su Strominger i Vafa – oslanjajući se na ranije spoznaje Susskinda i Sena – u elektroničkom fizikalnom arhivu objavili članak pod naslovom "Mikroskopsko porijeklo Bekenstein-Hawkingove entropije". U tom radu Strominger i Vafa uspjeli su teorijom struna odrediti mikroskopske sastavnice određene klase crnih rupa i precizno izračunati njihovu entropiju. Njihov rad oslonio se na novopronađenu sposobnost da se djelomično zaobiđu perturbacijske aproksimacije koje se primjenjivalo 1980-ih i početkom 1990-ih, a rezultat do kojega su došli precizno se poklapao s onim što su predvidjeli Bekenstein i Hawking, čime su napokon dovršili sliku koja je skicirana više od dva desetljeća ranije.

Strominger i Vafa usredotočili su se na klasu takozvanih *ekstremnih* crnih rupa. Te crne rupe natopljene su nabojem – možete ga smatrati električnim – i štoviše, imaju mini-

malnu moguću masu s obzirom na naboj koji nose. Kako se može vidjeti iz te definicije, blisko su povezane s BPS-stanjima, o kojima smo govorili u poglavlju 12. Zapravo, Strominger i Vafa iskoristili su tu sličnost u najvećoj mogućoj mjeri. Dokazali su da mogu – doduše u teoriji – konstruirati određene ekstremne crne rupe, polazeći od osobitog skupa BPS-brana (određenih dimenzija) i spojiti ih u skladu s preciznim matematičkim nacrtom. Na gotovo isti način kao što se može konstruirati atom – naravno, u teoriji – polazeći od hrpe kvarkova i elektrona koje su precizno rasporedili u protone i neutrone, okružene orbitirajućim elektronima, Strominger i Vafa pokazali su kako se neki novopronađeni sastojci teorije struna mogu na sličan način spojiti kako bi nastale osobite crne rupe.

U stvarnosti, crne rupe su jedan od mogućih konačnih proizvoda evolucije zvijezde. Kad zvijezda potroši sve svoje nuklearno gorivo nakon milijardi godina atomske fuzije,

ona više nema snage – to jest, tlaka usmjerenog prema svemirskom prostoru – da podnese golemu gravitacijsku silu, usmjerenu prema svom središtu. U vrlo različitim uvjetima, to rezultira kataklizmičkom implozijom goleme mase zvijezde; ona se silovito uruši pod svojom vlastitom težinom, i stvori crnu rupu. Suprotno tom, realističnom načinu nastanka, Strominger i Vafa zagovarali su "dizajnerske" crne rupe. Promijenili su pravila igre u nastajanju crnih rupa time što su pokazali da ih se može sistematski konstruirati – u teoretičarovoj imaginaciji – tako da se marljivo isplete precizna kombinacija brana koje su nastale u drugoj revoluciji superstruna.

Snaga tog pristupa odmah je postala jasna. Održavajući strogu teorijsku kontrolu nad mikroskopskim konstruiranjem svojih crnih rupa, Strominger i Vafa uspijevali su jasno i izravno brojiti broj rasporeda mikroskopskih konstituenata crne rupe koji ne mijenjaju njena empirijska svojstva, masu i naboje sila. Zatim su mogli usporediti taj broj s povr-

šinom horizonta crne rupe – entropijom koju su predvidjeli Bekenstein i Hawking. Kad su to Strominger i Vafa učinili, pronašli su savršeno poklapanje. Barem za klasu ekstremnih crnih rupa, uspjeli su upotrijebiti teoriju struna kako bi precizno objasnili mikroskopske konstituente i pripisanu im entropiju. I tako je četvrt stoljeća stara zagonetka napokon riješena.[6]

---

6 U svom prvom izračunu Strominger i Vafa pronašli su da matematika postaje lakša ako se radi s pet protežnih prostornovremenskih dimenzija, a ne četiri. Začudo, kad su dovršili izračun entropije takve, peterodimenzionalne crne rupe, shvatili su da nijedan teoretičar još nije bio konstruirao takve hipotetične ekstremne crne rupe u okviru peterodimenzionalne opće relativnosti. Budući da su svoje rezultate mogli potvrditi samo usporedbom svoga rješenja s područjem horizonta događaja takve hipotetične crne rupe, Strominger i Vafa odlučili su matematički konstruirati takvu peterodimenzionalnu crnu rupu. Uspjeli su. Tada nije bilo teško dokazati da se mikroskopski izračun entropije u teoriji struna slaže s onim

Mnogi teoretičari struna smatraju taj uspjeh važnim i uvjerljivim dokazom u korist teorije. Naše razumijevanje teorije struna još nije tako istančano da bi moglo biti u izravnom i preciznom doticaju s promatranjima, recimo, mase kvarka ili elektrona u eksperimentima. No sada vidimo da je teorija struna ponudila prvo fundamentalno objašnjenje jednog odavno ustanovljenog svojstva crnih rupa koje je mnogo godina zbunjivalo fizičare koji su se služili konvencionalnijim teorijama. A to svojstvo crnih rupa blisko je povezano s Hawkingovim predviđanjem da bi one trebale zračiti, a to predviđanje je barem u načelu empirijski mjerljivo. Naravno, za to je potrebno da napokon pronađemo crnu rupu negdje u svemiru i izradimo opremu dovoljno osjetljivu da detektira emitirano zračenje. Ako bi ta crna rupa bila dovoljno lagana, drugi korak je već u dosegu današnje tehnologije. Iako taj eksperimentalni program još nije postigao uspjeh, on iznova naglašava da se može premostiti jaz između teorije struna i konačnih fizikalnih iskaza o svijetu

prirode. Čak i Sheldon Glashow – najveći protivnik teorije struna u 1980-ima – nedavno je rekao. "Kad teoretičari struna govore o crnim rupama, tad gotovo da već govore o pojavama koje se može promatrati – a to je impresivno."[7]

što bi Hawking predvidio na temelju područja horizonta događaja crne rupe. No, zanimljivo je napomenuti da je rješenje za crne rupe nađeno kasnije, pa Strominger i Vafa nisu znali za to kad su se prihvatili svog izračuna entropije. Nakon njihova rada, brojni istraživači, koje je predvodio princetonski fizičar Curtis Callan, uspjeli su proširiti izračune entropije na poznat nam sklop četiriju protežnih prostornovremenskih dimenzija, i svi se poklapaju s Hawkingovim predviđanjima.

7 Razgovor sa Sheldonom Glashowom, 29. prosinca 1997.

Čak i uz taj dojmljiv napredak, crne rupe još su obavijene dvjema tajnama. Prva se odnosi na utjecaj crnih rupa na pojam determinizma. Na početku devetnaestog stoljeća francuski matematičar Pierre-Simon de Laplace izrekao je najstrožu i najdalekosežniju posljedicu mehaničkog univerzuma koja slijedi iz Newtonovih zakona gibanja:

> Inteligencija koja bi u danom trenutku uspjela razumjeti sve sile koje pokreću prirodu i stanje bića koja je tvore, i nadalje, kad bi bila dovoljno opsežna da te podatke podvrgne analizi, obuhvatila bi istom formulom gibanja najvećih tijela u univerzumu i ona najmanjih atoma. Za takvu inteligenciju ništa ne bi bilo neizvjesno, i njezine oči vidjele bi budućnost kao i prošlost.[8]

Drugim riječima, kad bismo u nekom trenutku znali položaj i brzinu svih čestica u svemiru, mogli bismo Newtonovim zakonima odrediti - barem u načelu – njihov položaj i

brzinu u svakom drugom trenutku u prošlosti ili budućnosti. Iz te perspektive, svaki događaj, od nastanka Sunca, preko Kristova raspeća do gibanja vaših očiju po ovom svijetu, strogo slijedi iz prethodnih položaja i brzina čestičnih sastojaka svemira u trenutku nakon velikog praska. To kruto viđenje mehanizma svemira postavlja svakojake filozofske dileme u vezi s pitanjem slobodne volje, ali otkriće kvantne mehanike znatno mu je smanjilo važnost. Vidjeli smo da Heisenbergovo načelo neodređenosti potkopava laplaceovski determinizam jer u bitnome smislu ne možemo znati precizan položaj i brzinu sastavnica svemira. Umjesto toga, ta klasična svojstva zamijenile su kvantne valne funkcije, koje nam kazuju samo vjerojatnost da je dana čestica ovdje ili ondje, ili da ima ovu ili onu brzinu.

No, pad Laplaceove vizije nije srušio i pojam determiniz-

---

8 Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities*, prev. Andrew I. Dale (New York: Springer-Verlag, 1995).

ma. Valne funkcije – valovi vjerojatnosti u kvantnoj mehanici – razvijaju se u vremenu u skladu s preciznim matematičkim pravilima, poput Schrödingerove jednadžbe (ili njenih preciznijih relativističkih pandana, poput Diracove jednadžbe i Klein-Gordonove jednadžbe). To nam govori da kvantni determinizam zamjenjuje Laplaceov klasični determinizam: znanje o valnim funkcijama svih fundamentalnih sastojaka svemira u nekom trenutku omogućilo bi da "dovoljno obuhvatna" inteligencija odredi valne funkcije u svakom trenutku u prošlosti i budućnosti. Kvantni determinizam govori nam da je *vjerojatnost* da će se neki događaj dogoditi u nekom odabranom trenutku u budućnosti u potpunosti *određena* znanjem o valnim funkcijama u svakom prošlom trenutku. Probabilistički aspekt kvantne mehanike znatno omekšava laplaceovski determinizam, jer neizbježni ishodi postaju vjerojatnosti ishoda, ali te vjerojatnosti su u potpunosti određene u konvencionalnom okviru kvantne teorije.

Hawking je 1976. izjavio da prisutnost crnih rupa oba-

ra čak i taj blaži oblik determinizma. Izračuni u osnovi te njegove izjave vrlo su opsežni, ali osnovna zamisao prilično je jednostavna. Kad nešto padne u crnu rupu, u nju bude usisana i njegova valna funkcija. No, to znači da bi se naša "dovoljno obuhvatna" inteligencija koja pokušava odrediti valne funkcije u budućnosti našla u teškoćama. Da bismo predvidjeli budućnost, moramo znati sve valne funkcije danas. Ali, ako je neka od njih pobjegla u ponor crne rupe, informacija koju ona sadrži je izgubljena.

Na prvi pogled, ta komplikacija koju stvaraju crne rupe ne bi nas trebala zabrinjavati. Budući da je sve što padne iza horizonta događaja crne rupe odsječeno od ostalog svemira, zar ne bismo mogli jednostavno ignorirati sve što je nekim nesretnim slučajem palo u nju? Štoviše, govoreći filozofski, zar ne bismo mogli reći da svemir zapravo nije izgubio informacije sadržane u tvari koja je pala u crnu rupu; one su samo zaključane u prostoru koji mi kao racionalna bića

izbjegavamo po svaku cijenu? Prije Hawkingove spoznaje da crne rupe nisu posve crne, odgovor na ta pitanja bio je pozitivan. No čim je Hawking obavijestio svijet da crne rupe zrače, priča se promijenila. Zračenje prenosi energiju i stoga, kako crna rupa zrači, ona polako isparava. Pritom se udaljenost od središta crne rupe do horizonta događaja polako smanjuje, a kad se ta koprena povuče, prostor koji je bio odsječen ponovno stupa u svemirsku arenu. Sada se naša filozofska razmatranja moraju suočiti sa stvarnošću: hoće li se informacije sadržane u stvarima koje je crna rupa progutala – podaci o kojima smo smatrali da postoje u unutrašnjosti crne rupe – iznova pojaviti kad crna rupa ispari? Te su informacije potrebne da bi se kvantni determinizam održao, i to pitanje zato povlači i ono važnije: unose li crne rupe još dublji element nasumičnosti u evoluciju našeg svemira.

Dok ovo pišem, fizičari se ne slažu u vezi s odgovorom na to pitanje. Hawking je godinama odlučno tvrdio da se te informacije neće iznova pojaviti – da crne rupe uništavaju

informacije i tako "unose novu razinu neodređenosti u fiziku, višu od uobičajene neodređenosti vezane uz kvantnu teoriju".[9] Zapravo, Hawking se, zajedno s Kipom Thorneom s Kalifornijskog instituta za tehnologiju, okladio s Johnom Preskillom, također s Kalifornijskog instituta za tehnologiju, u vezi s pitanjem što se događa s informacijama zarobljenim u crnoj rupi: Hawking i Thorne rekli su da su te informacije izgubljene zauvijek, a Preskill je zauzeo suprotno stajalište i okladio se da će se informacije pojaviti kad crna rupa ispari zračenjem. A u što su se okladili? U same informacije: "Onaj ili oni koji izgube nagradit će pobjednika ili pobjednike enciklopedijom po njegovom ili njihovom izboru."

Oklada još nije riješena, ali Hawking je nedavno priznao da novo razumijevanje teorije struna, koje smo ovdje izni-

---

9 Stephen Hawking, u: Hawking i Roger Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 1995), str. 41. Usp. *O prirodi prostora i vremena* (Sveučilišna knjižara, Zagreb 2002).

jeli, pokazuje da bi mogao postojati način da se informacije ipak pojave.[10] Nova zamisao glasi da se u onoj vrsti crnih rupa koju su proučavali Strominger i Vafa, kao i mnogi drugi fizičari nakon što je objavljen njihov članak, informacije mogu očuvati i obnoviti iz sastavnih brana. Strominger je nedavno rekao da je to saznanje "navelo neke teoretičare struna da proglase pobjedu – da ustvrde da se informacije vraćaju kako crne rupe isparavaju. Po mom mišljenju, taj zaključak je preuranjen; treba još mnogo raditi da vidimo je li to istina."[11] Vafa se slaže s tim i kaže da je on "u tom pitanju agnostik – tek treba vidjeti tko ima pravo".[12] Odgovor na to pitanje glavni je cilj današnjih istraživanja. Hawking je to izrazio ovako:

> Fizičari većinom vjeruju da se informacije ne gube, jer bi tako svijet bio siguran i predvidljiv. No ja vjerujem da, ako ozbiljno shvaćamo Einsteinovu opću teoriju relativnosti, onda moramo dopustiti mogućnost da se prostorvrijeme veže u čvorove i da se informacije gube u naborima. Odre-

diti gube li se informacije jedno je od glavnih pitanja u teorijskoj fizici danas.[13]

Druga neotkrivena tajna crnih rupa odnosi se na prirodu prostorvremena u središnjoj točki rupe.[14] Izravnom primjenom opće relativnosti, još od Schwarzschilda 1916, pokazuje se da golema masa i energija, zgusnute u središtu crne rupe, stvaraju razorno cijepanje u tkivu prostorvremena, koje se

---

10 Stephen Hawking, predavanje na Amsterdamskom simpoziju o gravitaciji, crnim rupama i strunama, 21. lipnja 1997.

11 Razgovor s Andrewom Stromingerom, 29. prosinca 1997.

12 Razgovor s Cumrunom Vafom, 12. siječnja 1998.

13 Stephen Hawking, predavanje na Amsterdamskom simpoziju o gravitaciji, crnim rupama i strunama, 21. lipnja 1997.

14 Taj problem ima utjecaja i na pitanje gubitka informacija, jer neki fizičari već godinama spekuliraju da bi u dubinama crne rupe mogla postojati središnja "grudica" u kojoj su sve informacije koje je nosila materija zarobljena unutar horizonta crne rupe.

radikalno uvija u stanje beskonačne zakrivljenosti – i urušava u prostornovremensku singularnost. Jedan od zaključaka koje su fizičari izvukli iz toga glasi: budući da je sva materija koja je prešla preko horizonta događaja neumoljivo uvučena u središte crne rupe, i budući da materija nema nikakvu budućnost kad dospije onamo, u središtu crne rupe i samo vrijeme prestaje postojati. Drugi fizičari, koji su godinama istraživali svojstva crnih rupa služeći se Einsteinovim jednadžbama, otkrili su daleku mogućnost da bi ona mogla biti prolaz prema drugom univerzumu, koji je tanko povezan s našim samo u središtu crne rupe. Pojednostavljeno govoreći, ondje gdje se okončava vrijeme u našem univerzumu, vrijeme u tako povezanom univerzumu tek počinje.

Neke implikacije te zapanjujuće mogućnosti razmotrit ćemo u sljedećem poglavlju, ali zasad želimo naglasiti jednu važnu tvrdnju. Moramo imati na umu glavnu pouku: ekstremno velika masa i malena veličina koje stvaraju nezamislivo veliku gustoću onemogućavaju isključivu upotrebu klasične

Einsteinove teorije i zahtijevaju da se u obzir uzme i kvantna mehanika. To nas navodi da postavimo pitanje što teorija struna ima reći o prostornovremenskoj singularnosti u središtu crne rupe? To je tema intenzivnih istraživanja danas, ali odgovora još nema, kao ni na pitanje o gubitku informacija. Teorija struna vješto razrješava razne druge singularnosti – nabore i cijepanja prostora raspravljena u poglavlju 11 i u prvom dijelu ovog poglavlja.[15] No ako ste vidjeli jednu singularnost, *niste* ih vidjeli sve. Tkivo našeg univerzuma može se naborati, poderati i rascijepiti na mnogo načina. Teorija struna pruža nam duboke uvide u neke od tih singularnosti, ali druge, a među njima je i singularnost crnih

---

15 Zapravo, konifoldni prijelazi s cijepanjem prostora o kojima smo govorili u ovom poglavlju uključuju crne rupe i stoga bi se moglo činiti da su povezane s pitanjem njihovih singularnosti. No prisjetimo se da se konifoldno cijepanje pojavljuje upravo kad crna rupa odbaci svu svoju masu, i stoga nije izravno povezano s pitanjima koja se odnose na singularnosti crnih rupa.

rupa, zasad izmiču teoretičarima. Glavni razlog toga i ovdje je oslanjanje na perturbacijska sredstva u teoriji struna, čije aproksimacije u ovom slučaju umanjuju našu sposobnost da pouzdano i potpuno analiziramo što se događa u dubokoj unutrašnjosti crne rupe.

Međutim, s obzirom na velik napredak neperturbacijskih metoda i njihovu uspješnu primjenu na druge aspekte crnih rupa, teoretičari struna gorljivo se nadaju da će se tajne u središtu crnih rupa uskoro početi otkrivati.

ČETRNAESTO POGLAVLJE

Razmišljanja o kozmologiji

Ljudi oduvijek strastveno žele razumjeti porijeklo svemira. Vjerojatno nijedno drugo pitanje u toj mjeri ne nadilazi kulturne i vremenske podjele te nadahnjuje maštu naših drevnih prethodnika i istraživanja modernih kozmologa. Na nekoj dubljoj razini postoji kolektivna čežnja za objašnjenjem zašto svijet postoji, kako je poprimio oblik kojemu

svjedočimo i po kojoj se logici – kojem načelu – odvija njegova evolucija. No najviše zapanjuje to što je čovječanstvo danas došlo do točke u kojoj se pojavljuje okvir za nalaženje znanstvenih odgovora na neka od tih pitanja.

Trenutačno prihvaćena znanstvena teorija nastanka svemira objavljuje kako je svemir u svojim prvim trenucima bio u ekstremnim uvjetima goleme energije, temperature i gustoće. Danas je poznato da u tim uvjetima moramo uzeti u obzir i kvantnu mehaniku i gravitaciju, te je nastanak svemira stoga izvrsno poprište za provjeru saznanja teorije superstruna. Uskoro ćemo raspravljati o tim spoznajama u nastajanju, ali prvo ćemo ukratko izložiti kozmološku pripovijest kakva je bila prije teorije struna, pripovijest koju se često naziva *standardnim kozmološkim modelom*.

Moderna teorija o porijeklu svemira nastala je petnaestak godina nakon što je Einstein dovršio opću teoriju relativnosti. Premda je Einstein odbio uzeti svoju vlastitu teoriju zdravo za gotovo i nije prihvatio njezinu implikaciju da svemir nije ni vječan ni statičan, Aleksandar Fridman nije oklijevao. Kao što smo izložili u poglavlju 3, Fridman je otkrio rješenje Einsteinovih jednadžbi koje se danas naziva velikim praskom – rješenje koje objavljuje da je svemir izronio iz stanja beskonačne zgusnutosti i još je u stanju širenja nakon te prvotne eksplozije. Einstein je bio tako siguran da ta rješenja s promjenjivim vremenom nisu rezultat njegove teorije da je objavio kratak članak u kojemu je ustvrdio da je pronašao fatalnu grešku u Fridmanovom radu. No nakon otprilike osam mjeseci Fridman je uspio uvjeriti Einsteina da nije pogriješio; Einstein je javno povukao svoju primjedbu, ali bez mnogo riječi. No ipak je jasno da je Einstein dr-

bu, ali bez mnogo riječi. No ipak je jasno da je Einstein držao da Fridmanovi rezultati nisu relevantni za univerzum. Ali oko pet godina potom, Hubbleova detaljna promatranja nekoliko desetaka galaksija, koja je obavljao dvaipolmetarskim teleskopom zvjezdarnice Mount Wilson, potvrdila su da se svemir doista širi. Fridmanov rad, kojemu su fizičari Howard Robertson i Arthur Walker dali sustavniji i djelotvorniji oblik, i danas je temelj moderne kozmologije.

Podrobnije govoreći, moderna teorija o porijeklu svemira glasi kako slijedi. Prije nekih petnaest milijardi godina svemir je erumpirao u ekstremno visokoenergijskom, singularnom događaju koji je stvorio sav prostor i svu materiju. (Ne moramo dugo tražiti mjesto gdje se taj veliki prasak dogodio, jer je to mjesto ondje gdje ste vi sada, kao i sva druga; na početku su sva mjesta, koja danas vidimo kao različita, bila *isto* mjesto.) Izračunato je da jet emperatura svemira nakon 10^{-43} sekundi nakon praska, u takozvano Planckovo vrijeme, bila oko 10^{32} kelvina, 10 bilijuna bilijuna puta

viša od duboke unutrašnjosti Sunca. S prolaskom vremena svemir se širio i hladio, a na početku homogena, vrela, primordijalna kozmička plazma počela se oblikovati u virove i nakupine. Oko stotisućinke sekunde nakon praska stvari su se dovoljno ohladile (na oko 10 bilijuna kelvina – što je oko milijun puta viša temperatura od one u unutrašnjosti Sunca) da se kvarkovi okupe u trojkama te formiraju protone i neutrone. Otprilike nakon stotinke sekunde stvorili su se uvjeti da se u hladećoj plazmi počnu stvarati jezgre najlakših elemenata u periodnom sustavu elemenata. Sljedeće tri minute, dok se uzavreli svemir hladio do temperature od oko milijardu stupnjeva, prevladavale su jezgre vodika i helija, uz tragove deuterija ("teškoga" vodika) i litija. To se naziva razdobljem *primordijalne nukleosinteze.*

Sljedećih stotinu tisuća godina nije se događalo mnogo, osim daljnjeg širenja i hlađenja. No, kad je temperatura pala na nekoliko tisuća stupnjeva, silovito strujanje elektrona usporilo se do te mjere da su ih uspijevale uhvatiti

atomske jezgre, uglavnom vodika i helija, pa su tako nastali prvi električno neutralni atomi. Bio je to presudan trenutak: tada je svemir u cjelini postao proziran. Prije razdoblja zarobljavanja elektrona svemir je bio prožet gustom plazmom električno nabijenih čestica – nekih s pozitivnim nabojem, poput jezgri, i drugih s negativnim nabojem, poput elektrona. Fotoni, koji stupaju u interakcije samo s električno nabijenim objektima, neprekidno su se sudarali s gustom juhom nabijenih čestica, pa gotovo da nisu uspijevali prevaliti nikakvu udaljenost prije nego što bi bili apsorbirani ili skrenuti s putanje. Zbog te barijere koju su nabijene čestice predstavljale gibanju fotona, svemir bi nam bio gotovo posve neproziran, poput guste jutarnje magle ili zasljepljujuće snježne oluje. No, kad su negativno nabijene čestice uvedene u orbitu oko pozitivno nabijenih jezgri, više nije bilo tih električno nabijenih opstrukcija, nastali su električno neutralni atomi, a gusta magla se podigla. Fotoni iz vremena

velikog praska otada neometano putuju, a pogledu se otvara cijelo svemirsko prostranstvo.

Nakon oko milijardu godina, kad se svemir znatno smirio nakon grozničavog početka, počele su nastajati galaksije, zvijezde, a na kraju i planeti, kao gravitacijom povezane nakupine primordijalnih elemenata. Danas, petnaestak milijardi godina nakon praska, možemo se diviti i veličanstvenosti svemira i svojoj kolektivnoj sposobnosti da sastavimo razumnu i empirijski provjerljivu teoriju nastanka svemira.

Ali, koliko bismo doista trebali vjerovati u teoriju velikog praska?

Testiranje velikog praska

Promatrajući svemir najjačim teleskopima, astronomi vide svjetlo koje su galaksije i kvazari emitirali tek nekoliko milijardi godina nakon velikog praska. Tako mogu potvrditi

širenje svemira predviđeno teorijom velikog praska, sve do te rane faze svemira; sve se veoma dobro poklapa. Da bi testirali teoriju u još ranijem razdoblju, fizičari i astronomi moraju se poslužiti neizravnim metodama. Jedan od istančanijih pristupa oslanja se na takozvano *kozmičko pozadinsko zračenje*.

Ako ste ikad opipali gumu bicikla nakon što ste je žustro napumpali zrakom, onda znate da te topla na dodir. Dio energije koju ste potrošili ponavljanim pokretima pumpanja prenio se u porast temperature zraka u gumi. To je izraz općeg načela: u vrlo raznolikim uvjetima, kad se tvar zgusne, ona se i ugrije. Obrnemo li tu logiku, kad se tvar dekomprimira – kad se širi – ona se i hladi. Na tom načelu rade klimatizacijski uređaji i hladnjaci: u njima se tvari poput freona podvrgavaju ponavljanim ciklusima zgušnjavanja i širenja (kao i isparavanja i kondenziranja) kako bi se toplina usmjerila u željenom smjeru. Premda su to jedno-

stavne činjenice zemaljske fizike, pokazalo se da su duboko ugrađene u kozmos kao cjelinu.

Gore smo vidjeli da, nakon što se elektroni i jezgre spoje i formiraju atome, fotoni se slobodno i neometano gibaju svemirom. To znači da je svemir pun fotonskog "plina" koji se giba ovamo i onamo, i jednoliko je raspoređen po svemiru. Kako se svemir širi, taj "plin" slobodnih fotona također se širi jer, u biti, svemir je njegova "posuda". I, isto kao što se temperatura običnog plina (poput zraka u gumi bicikla) smanjuje kako se plin širi, tako se i temperatura tog fotonskog "plina" smanjuje kako se svemir širi. Zapravo, fizičari još od Georgea Gamowa i njegovih studenata Ralpha Alphera i Roberta Hermanna 1950-ih te Roberta Dickea i Jima Peeblesa sredinom 1960-ih znaju da bi današnji svemir trebao biti prožet gotovo jednolikom kupkom tih primordijalnih fotona, koji su se tijekom 15 milijardi godina svemirskog širenja ohladili sve do tek nekoliko stupnjeva iznad apsolutne nule.[1] Godine 1965. Arno Penzias i Robert Wil-

son iz Bell Laboratories u New Jerseyju slučajno su došli do jednoga od najvećih otkrića našeg doba kad su detektirali to svjetlucanje velikog praska radeći na anteni namijenjenoj za komunikacijske satelite. Kasnija istraživanja usavršila su i teoriju i eksperiment te kulminirala u mjerenjima koja je početkom 1990-ih proveo NASA-in satelit COBE (Cosmic Background Explorer, istraživač kozmičkog pozadinskog zračenja). Tim podacima su fizičari i astronomi s visokom preciznošću potvrdili da je svemir prožet mikrovalnim zračenjem (kad bi naše oči bile osjetljive na mikrovalove, vidjeli bismo raspršeno svjetlucanje u svijetu oko sebe) čija temperatura iznosi oko 2,7 stupnja iznad apsolutne nule, što

---

[1] Preciznije rečeno, svemir bi trebao biti pun fotona koji odgovaraju toplinskom zračenju savršeno apsorbirajućeg tijela – "crnog tijela", rečeno jezikom termodinamike – u navedenom temperaturnom rasponu. To je isti spektar zračenja koji kvantnomehanički emitiraju crne rupe, kao što je objasnio Hawking, i vruća pećnica, kao što je objasnio Planck.

se savršeno poklapa s predviđanjima teorije velikog praska. Govoreći konkretno, u svakom kubnom metru svemira – uključujući i onaj koji vi upravo zauzimate – u prosjeku je oko 400 milijuna fotona koji zajedno čine prostrano kozmičko more mikrovalnog zračenja – odjek čina stvaranja. Određen postotak "snijega" koji vidite na ekranu vašeg televizora kad je podešen na stanicu koja je prestala emitirati prouzročen je tim odjekom velikog praska. To poklapanje teorije s empirijskim podacima potvrđuje kozmološku sliku koju daje teorija velikog praska, sve do vremena kad su se fotoni prvi put počeli slobodno gibati svemirom, nekoliko stotina tisuća godina nakon praska (n.p.).

Možemo li u svojim testovima teorije velikog praska poći i dalje, u još ranije doba? Možemo. Služeći se standardnim načelima nuklearne teorije i termodinamike, fizičari mogu izražavati konkretna predviđanja o relativnom obilju lakih elemenata nastalih u razdoblju primordijalne nukleosinteze, između stotinke sekunde i nekoliko minuta n.p.

Prema teoriji, na primjer, oko 23 posto svemira trebalo bi se sastojati od helija. Mjereći količinu helija u zvijezdama i maglicama, astronomi su prikupili dojmljive podatke koji svjedoče da je to predviđanje pun pogodak. Vjerojatno je još dojmljivije predviđanje i potvrda u vezi s količinom deuterija, jer u biti ne postoji nijedan astrofizički proces, osim velikog praska, koji bi mogao objasniti njegovu malenu, ali nepobitnu prisutnost u svemiru. Potvrda tih količina, a u novije vrijeme čak i količine litija, osjetljiv je test našega razumijevanja fizike ranoga svemira, sve do vremena njihove primordijalne sinteze.

To je toliko dojmljivo da nam malo nedostaje da postanemo i umišljeni. Svi podaci koje imamo potvrđuju teoriju kozmologije koja je kadra opisati univerzum od oko stotinke sekunde n.p. do sadašnjosti, oko 15 milijardi godina potom. No ipak, ne bismo smjeli izgubiti iz vida činjenicu da se novorođeni svemir razvijao nevjerojatno brzo. Si-

ćušni djelići sekunde – mnogo kraći od stotinke – činili su kozmičke epohe tijekom kojih su u univerzum ubilježena njegova trajna svojstva. I tako su fizičari i dalje napredovali, pokušavajući objasniti svemir u sve ranije doba. Budući da se s tim vraćanjem svemir sve više smanjuje, zagrijava i zgušnjava, precizan kvantnomehanički opis materije i sila postaje sve važniji. Kao što smo u prethodnim poglavljima vidjeli s drugih gledišta, teorija kvantnog polja s točkastim česticama djeluje sve dok tipične energije čestica ne dosegnu Planckovu energiju. U kozmološkom kontekstu, to se dogodilo kad je cijeli poznati svemir stao unutar ljuske Planckove veličine, i bio toliko gust da mašta nije u stanju pronaći prikladnu metaforu ni prikladnu analogiju: gustoća svemira u Planckovo vrijeme bila je jednostavno *kolosalna*. Pri takvim energijama i gustoćama, gravitacija i kvantna mehanika više se ne mogu smatrati dvama posebnim entitetima, kao što ih se smatra u kvantnoj teoriji polja u fizici točkastih čestica. Umjesto toga, glavna poruka ove knjige glasi da na takvim i

višim energijama moramo prizvati teoriju struna. Govoreći vremenski, na takve energije i gustoće nailazimo kad se upustimo u ranije razdoblje od Planckova vremena od 10^{-43} sekundi n.p., i zato je ta najranija epoha kozmološka arena teorije struna.

Uputimo se u to razdoblje. Prvo pogledajmo što nam standardna kozmološka teorija kaže o svemiru prije stotinke sekunde n.p., ali nakon Planckova vremena.

Od Planckova vremena do stotinke sekunde n.p.

Prisjetimo se iz poglavlja 7 (posebno slike 7) da se čini kako se u vrlo vrućoj okolini ranoga svemira stapaju tri negravitacijske sile. Fizičari su izračunavali kako se iznosi tih sila mijenjaju s promjenom energije i temperature, i ti izračuni pokazuju da su prije oko 10^{-35} sekunde n.p. jaka, slaba i elek-

tromagnetska sila bile jedna, "ujedinjena sila" ili "supersila". Svemir je u tom stanju bio mnogo više simetričan nego danas. Poput homogenosti koja nastaje kad se više različitih metala ugrije i taljenjem pretopi u jednoličnu užarenu tekućinu, važne razlike između sila koje danas uočavamo tada su bile izbrisane krajnje visokom energijom i temperaturom na samim počecima svemira. No kako je vrijeme prolazilo i svemir se hladio, formalizam kvantne teorije polja pokazuje nam da bi se ta simetrija naglo smanjila, u nizu prilično naglih koraka, što bi na kraju dovelo do relativno asimetričnog oblika koji nam je poznat.

Nije teško razumjeti fiziku u osnovi tog smanjivanja simetrije, ili *sloma simetrije*, kako se to preciznije naziva. Zamislimo veliku posudu s vodom. Molekule H_2O jednoliko su raspršene posudom i bez obzira na kut pod kojim ih promatrate, voda izgleda jednako. A sada pogledajte posudu dok smanjujete temperaturu. Isprva se ne događa mnogo toga. Prosječna brzina vode na mikroskopskoj ra-

mnogo toga. Prosječna brzina vode na mikroskopskoj razini smanjuje se, ali to je zapravo sve. No kad temperaturu smanjite na 0 stupnjeva Celzija, odjednom vidite da se događa nešto drastično. Tekuća voda počinje se zamrzavati i pretvarati u kruti led. Kao što smo raspravili u prethodnom poglavlju, to je jednostavan primjer promjene agregatnog stanja, ili faznog prijelaza. U našu današnju svrhu važno je napomenuti da fazni prijelaz rezultira smanjenjem količine simetrije koju prikazuju molekule H_2O. Dok tekuća voda izgleda jednako bez obzira na kut iz kojeg je gledamo – čini se da je rotacijski simetrična – kruti led je drukčiji. On ima kristalnu strukturu, što znači da, ako ga dovoljno precizno promotrimo, on će poput svakoga kristala izgledati drukčije iz drukčijih kutova. Fazni prijelaz rezultirao je primjetnim smanjenjem količine rotacijske simetrije.

Iako smo raspravili samo jedan, poznat primjer, poanta vrijedi općenito: kako snižavamo temperaturu mnogih fizikalnih sustava, oni u nekom trenutku prolaze kroz fazni pri-

jelaz koji obično rezultira smanjivanjem ili "slomom" nekih njihovih prethodnih simetrija. Zapravo, sustav može proći kroz niz faznih prijelaza ako mu se temperatura mijenja u dovoljno širokom rasponu. I tu nam voda može poslužiti kao jednostavan primjer. Počnemo li s H_2O iznad 100 stupnjeva Celzija, ona je plin: vodena para. U tom obliku sustav ima još veću simetriju nego u tekućoj fazi jer se pojedinačne molekule H_2O oslobađaju od svoje zagušene, ljepljive, tekuće forme. Umjesto toga, sve šibaju po cijeloj posudi, posve ravnopravno, ne tvoreći nikakve nakupine ni "klike" u kojima se skupine molekula izdvajaju i formiraju bliske veze na račun drugih molekula. Molekularna demokracija vlada na dovoljno visokim temperaturama. Kad snizimo temperaturu ispod 100 stupnjeva, naravno, formiraju se kapljice vode i prolazimo kroz fazni prijelaz iz plinovitog u tekuće stanje, i simetrija se smanjuje. Dok dalje snižavamo temperaturu, ne događa se ništa dramatično sve dok ne dosegnemo 0 stupnjeva Celzija, a tada, kao i gore, fazni prijelaz iz stanja tekuće

vode u led rezultira drugim naglim smanjivanjem simetrije.

Fizičari vjeruju da između Planckova vremena i stotinke sekunde n.p. svemir ponašao vrlo slično, prošavši kroz barem dva analogna fazna prijelaza. Na temperaturama iznad 10^{28} Kelvina, tri negravitacijske sile pojavljivale su se kao jedna, simetrično u najvećoj mogućoj mjeri. (Na kraju ovog poglavlja razmotrit ćemo uključivanje gravitacijske sile u to visokotemperaturno taljenje u teoriji struna.) No kad je temperatura pala ispod 10^{28} kelvina, svemir je prošao kroz fazni prijelaz u kojem su se tri sile na različite načine kristalizirale iz svog prethodnog jedinstva. Njihovi relativni iznosi i pojedinosti o tome kako djeluju na materiju počele su se razilaziti. I tako, simetrija među silama koja je bila očita na višim temperaturama bila je razbijena kad se svemir dovoljno ohladio. No ipak, rad Glashowa, Salama i Weinberga (poglavlje 5) pokazuje da nije izbrisana sva visokotemperaturna simetrija: slaba i elektromagnetska sila još su bile du-

boko isprepletene. Dok se svemir dalje širio i hladio, nije se događalo mnogo toga sve dok se temperatura nije spustila na 10^{15} kelvina – što je stotinjak puta više od temperature u središtu Sunca – kad je svemir prošao kroz još jedan fazni prijelaz koji je utjecao na elektromagnetsku slabu silu. Na toj temperaturi i one su se kristalizirale iz prethodnog jedinstva, u većoj mjeri simetričnog, i kako se svemir i dalje hladio, njihove razlike su se povećavale. Ta dva fazna prijelaza odgovorna su za tri naizgled odvojene negravitacijske sile koje djeluju u svijetu, iako se u ovom prikazu povijesti svemira vidi da su te sile zapravo duboko povezane.

Kozmološka zagonetka

Ta kozmologija post-plankovskog razdoblja pruža elegantan, konzistentan i izračunljiv okvir za razumijevanje svemira sve do najkraćih trenutaka nakon praska. No, kao što

je slučaj s većinom uspješnih teorija, naše nove spoznaje postavljaju još detaljnija pitanja. Pokazalo se da neka od tih pitanja, iako ne obaraju ovdje izložen standardni kozmološki scenarij, ipak ističu problematične aspekte koji naznačuju potrebu za dubljom teorijom. Usredotočimo se na jedan od njih. Naziva se *problemom horizonta*, i to je jedno od najvažnijih pitanja u modernoj kozmologiji.

Detaljna proučavanja kozmičkog pozadinskog zračenja pokazala su da, bez obzira na to u koju točku na nebu usmjerimo antenu kojom ga mjerimo, temperatura zračenja je ista, izmjerena s preciznošću od jedan prema 100 000. Ako malo razmislimo o tome, shvatit ćemo da je to prilično neobično. Zašto bi različita mjesta u svemiru, odvojena golemim udaljenostima, imala tako dobro usklađenu temperaturu? Naizgled prirodno rješenje te zagonetke glasi: da, dva dijametralno suprotna mjesta na nebu su danas vrlo daleko jedno od drugoga, ali poput blizanaca razdvojenih pri

rođenju, u najranijim trenucima svemira bila su vrlo blizu (kao i sve drugo). Budući da su nastala u istoj polaznoj točki, rekli biste da uopće ne iznenađuje što imaju zajednička fizikalna obilježja, poput temperature.

No, to rješenje ne vrijedi u standardnoj kozmologiji velikog praska. Evo zašto. Tanjur vruće juhe postupno se hladi na sobnu temperaturu jer je u doticaju s okolnim, hladnijim zrakom. Pričekamo li dovoljno dugo, temperatura juhe i zraka će se zbog njihova doticaja izjednačiti. Ali ako je juha u termosboci, ona će, naravno, mnogo dulje zadržati temperaturu, jer je komunikacija s okolinom mnogo slabija. To je odraz činjenice da homogenizacija temperature između dvaju tijela počiva na njihovoj dugotrajnoj i neometanoj komunikaciji. Da bismo testirali sugestiju da lokacije u svemiru koje su danas razdvojene velikim udaljenostima imaju istu temperaturu zbog toga što su na početku bile u doticaju, moramo ispitati djelotvornost razmjene informacija među njima u počecima svemira. Isprva biste mogli pomisliti da je komunikacija tada

bila lakša, jer su lokacije bile bliže jedne drugima. Ali prostorna bliskost samo je dio priče. Drugi dio je trajanje.

Kako bismo je potpunije istražili, zamislimo da gledamo "film" kozmičkog širenja, ali unatrag, od danas do trenutka velikog praska. Budući da brzina svjetlosti postavlja granicu tome koliko brzo može putovati signal ili informacija bilo koje vrste, materija u dvama područjima prostora može razmjenjivati toplinsku energiju i stoga uopće imati šansu da izjednači temperaturu samo ako je udaljenost među njima u danom trenutku manja od udaljenosti koju bi svjetlost mogla prevaliti u vremenu koje je proteklo od velikog praska. I tako, kako odvijamo film unatrag u vremenu, vidimo da traje natjecanje između toga koliko se naša područja međusobno približavaju i toga koliko moramo odviti sat unatrag da bi ona tamo dospjela. Na primjer, da bi udaljenost između naših dviju lokacija bila 300 000 kilometara, moramo odviti film sve do manje od sekunde n.p., a onda iako su ona mno-

go bliže, ipak nikako ne mogu utjecati jedna na drugu jer bi svjetlosti bila potrebna cijela sekunda da prevali udaljenost među njima.[2] A da bi njihova udaljenost bila mnogo manja, recimo 300 kilometara, moram odvrtjeti film unatrag sve do tisućinke sekunde n.p., i došli bismo do istog zaključka: one ne mogu utjecati jedna na drugu jer za manje od tisućinke sekunde svjetlost ne može prevaliti 300 kilometara koji ih razdvajaju. Nastavimo li tako, ako moramo odvrtjeti film na manje od milijardinke sekunde n.p. kako bi te lokacije bile udaljene samo 30 centimetara, one i dalje ne mogu utjecati jedna na drugu jer jednostavno nije prošlo dovoljno vremena od velikog praska da svjetlost prevali tih 300 milimetara. To nam dokazuje da, samo to što se dvije točke u svemiru sve više približavaju kako se vraćamo prema prasku, nije dovoljno da im omogući da budu u toplinskom doticaju – poput onog između juhe i zraka – koji bi bio nužan kako bi mogle imati istu temperaturu.

Fizičari su dokazali da se u standardnom modelu velikog

praska javlja upravo taj problem. Detaljni izračuni pokazuju da područja svemira koja su danas vrlo daleko jedna od dru-

---

[2] U ovom izlaganju prenosimo duh rasprave o navedenim problemima, iako samo dotičemo neka stručna pitanja koja se odnose na gibanje svjetlosti u svemiru koji se širi jer sadrže detaljnu brojčanu analizu. Konkretno, iako specijalna teorija relativnosti objavljuje da se ništa ne može gibati brže od svjetlosti, to ne isključuje mogućnost da se dva fotona, nošena širenjem tkiva prostora, udaljavaju jedan od drugoga brzinom koja je veća od brzine svjetlosti. Na primjer, u doba kad je svemir prvi put postao proziran, oko 300 000 godina n.p., lokacije u svemiru koje su bile međusobno udaljene oko 900 000 svjetlosnih godina mogle su utjecati jedna na drugu, iako je udaljenost među njima bila veća od 300 000 svjetlosnih godina. Dodatni faktor 3 potječe od širenja tkiva prostora. To znači da, kako odvijamo kozmički film unatrag kroz vrijeme, kad dođemo do 300 000 godina n.p., dvije točke u svemiru moraju biti udaljene manje od 900 000 svjetlosnih godina kako bi jedna mogla utjecati na temperaturu druge. Ta detaljna brojčana analiza ne mijenja kvalitativna svojstva razmatranih pitanja.

gih nikako nisu mogla razmijeniti toplinsku energiju te tako steći istu temperaturu. Budući da se riječ "horizont" odnosi na to koliko daleko možemo vidjeti – koliko daleko svjetlost može putovati, da se tako izrazimo – tu neobjašnjenu jednolikost temperature diljem golemog svemirskog prostranstva fizičari zovu "problemom horizonta". Ta zagonetka ne znači da je standardna kozmološka teorija pogrešna. No, jednolikost temperature jaka je naznaka da nam nedostaje važan dio kozmološke priče. Godine 1979. fizičar Alan Guth, sada na MIT-u, napisao je poglavlje koje je nedostajalo.

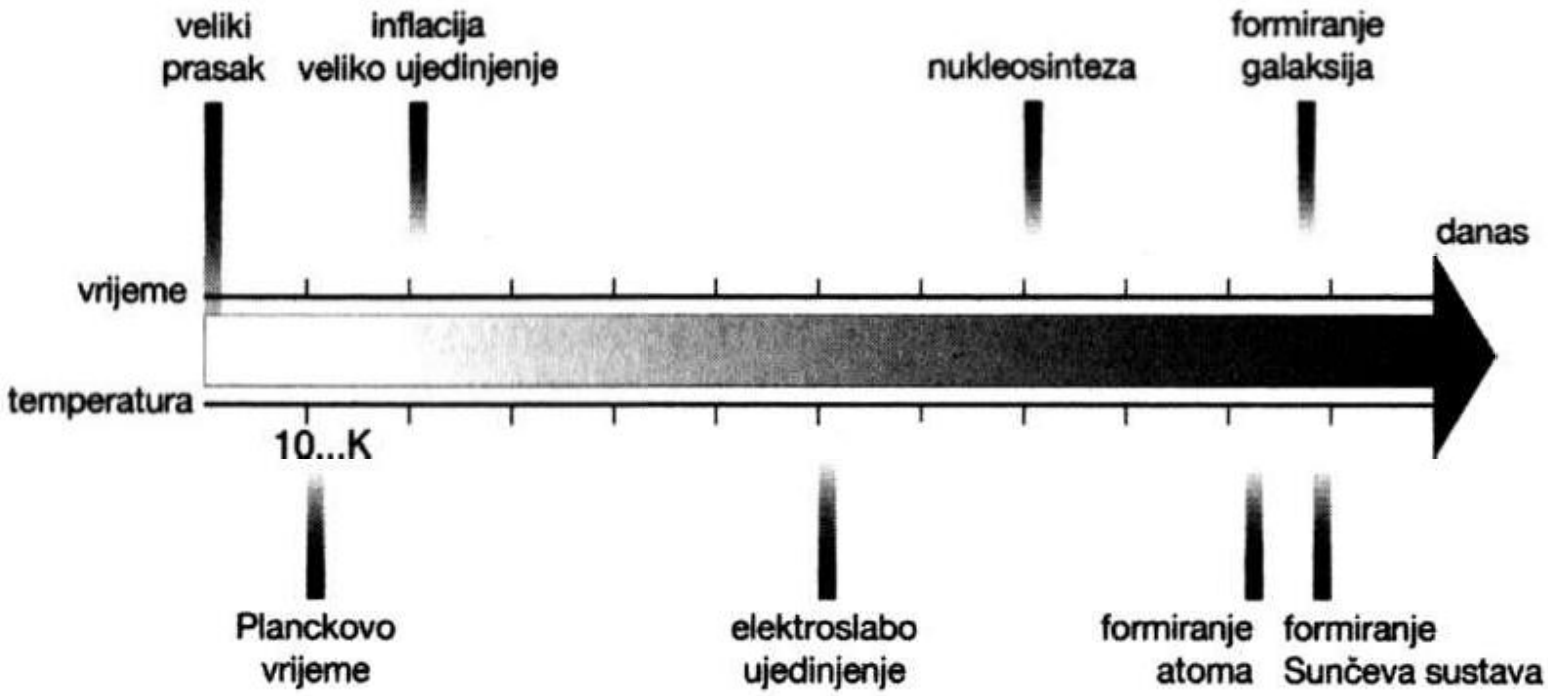
Inflacija

Korijen problema horizonta u tome je što da bismo približili dva udaljena područja svemira, moramo odviti kozmički film unatrag, prema samom početku vremena. Zapravo, toliko unatrag da nema dovoljno vremena da bilo koji fi-

zikalni utjecaj prevali put od jednog do drugog područja. Dakle, problem je u tome što, kako odvijamo kozmološki film unatrag i približavamo se velikom prasku, svemir se ne smanjuje dovoljno brzo.

To je osnovna ideja, ali bilo bi dobro malo dotjerati taj opis. Problem horizonta izvire iz činjenice da, poput lopte bačene u zrak, privlačna sila gravitacije *usporava* stopu širenja svemira. To znači da, na primjer, kako bismo prepolovili udaljenost između dviju lokacija u svemiru, moramo vratiti film više nego pola prema početku. Isto tako, da bismo prepolovili udaljenost, moramo više nego prepoloviti vrijeme proteklo od velikog praska. Manje vremena nakon praska – govoreći o razmjerima – znači da je *teže* da dva područja komuniciraju, iako su se približila.

Sada je jednostavno izraziti Guthovo rješenje problema. On je pronašao drugo rješenje Einsteinovih jednadžbi u kojemu vrlo rani svemir prolazi kroz kratko razdoblje vrlo



Slika 14.1 Vremenski pravac s presudnim trenucima u povijesti svemira.

brzog širenja – razdoblje u kojemu "napuhuje" svoju veličinu neočekivanom, *eksponencijalnom* stopom širenja. Za razliku od lopte koja usporava nakon što je bacite u zrak, eksponencijalno širenje *ubrzava* se. Kad odvijemo kozmički film unatrag, brzo ubrzavajuća ekspanzija pretvara se u brzo

usporavajuću kontrakciju. To znači da, kako bismo prepolovili udaljenost između dviju lokacija u svemiru (tijekom eksponencijalnog razdoblja), trebamo odviti film unatrag manje nego do polovice – zapravo, mnogo manje. To što film moramo odvrtjeti manje implicira da će dva područja imati više vremena za termalnu komunikaciju i, poput juhe i zraka, imat će dovoljno vremena da izjednače temperaturu.

Zahvaljujući Guthovom otkriću i njegovim kasnijim poboljšanjima Andreja Lindea, danas na sveučilištu Stanford, Paula Steinhardta i Andreasa Albrechta, tada na sveučilištu države Pennsylvanije, i mnogi drugih, standardni kozmološki model pretvoren je u *inflacijski* kozmološki model. U tom okviru, standardni kozmološki model se promijenio u sićušnom vremenskom razmaku – od oko 10^{-36} do 10^{-34} sekunde – u kojemu se svemir proširio za kolosalan faktor od barem 10^{30}, u usporedbi s faktorom od oko 100 u istom vremenskom razmaku u standardnom scenariju. To znači

da se u kratkom trenutku, oko bilijuntinku bilijuntinke bilijuntinke sekunde n.p., veličina svemira povećala za veći postotak nego u 15 milijardi godina nakon toga. Prije te ekspanzije, materija koja je danas u dalekim svemirskim prostranstvima bila je mnogo bliže nego u standardnom kozmološkom modelu, pa je bilo moguće da se lako uspostavi zajednička temperatura. A tada, u Guthovom trenutačnom izboju kozmološke inflacije – koji je slijedila obična ekspanzija standardnog kozmološkog modela – ta su se područja svemira uspjela razdvojiti na velike udaljenosti kojima danas svjedočimo. I tako, kratka i ali dalekosežna inflacijska modifikacija standardnog kozmološkog modela rješava problem horizonta (kao i još neke važne probleme, o kojima nismo raspravljali) i široko je prihvaćena među kozmolozima.[3]

Povijest svemira prema današnjoj teoriji, od tik nakon Planckova vremena do danas, ukratko prikazujemo na slici 14.1.

Na slici 14.1 ostaje djelić između velikog praska i Planckova vremena koji još nismo raspravili. Slijepom primjenom jednadžbi opće teorije relativnosti na to područje fizičari su otkrili da svemir postaje sve manji, sve vrući i sve gušći kako se krećemo unatrag kroz vrijeme prema prasku. U nultom vremenu, kad svemir nema nikakvu veličinu, temperatura i gustoća odlaze u beskonačnost, što nam je najbolja naznaka da se taj teorijski model svemira, koji se čvrsto drži klasičnog gravitacijskog okvira opće teorije relativnosti, u potpunosti raspao.

---

[3] Detaljnu i živahnu diskusiju o otkriću inflacijskog kozmološkog modela i problemima koje on rješava vidi u: Alan Guth, *The Inflationary Universe* (Reading, Mass: Addison-Wesley, 1997).

Priroda nam nedvosmisleno govori da u tim uvjetima moramo spojiti opću relativnost s kvantnom mehanikom – drugim riječima, moramo se poslužiti teorijom struna. Istraživanja implikacija teorije struna za kozmologiju još su u začecima. Perturbacijske metode mogu u najboljem slučaju dati tek najosnovnije uvide, jer ekstremna energija, temperatura i gustoća zahtijevaju preciznu analizu. Iako je druga revolucija superstruna pružila neke neperturbacijske metode, proći će neko vrijeme prije nego što ih se prilagodi onakvim izračunima kakvi su potrebni u kozmološkom kontekstu. No ipak, fizičari su posljednjih desetak godina učinili prve korake prema razumijevanju kozmologije struna. Evo što su otkrili.

Čini se da teorija struna mijenja standardni kozmološki model na tri bitna načina. Prvo, na način koji se još razrađuje u najnovijim istraživanjima, teorija struna implicira da svemir ima najmanju moguću veličinu. To ima duboke posljedice za naše razumijevanje svemira u samom trenutku

velikog praska, kada standardna teorija tvrdi da se veličina smanjila sve do nule. Drugo, teorija struna ima dvojnost malenog/velikog polumjera (blisko povezanu s tim da je on najmanje moguće veličine), što također ima veliku kozmološku važnost, kao što ćemo uskoro vidjeti. Na kraju, teorija struna ima više nego četiri prostornovremenske dimenzije, a s kozmološkog stajališta, moramo razmotriti razvoj svih njih. Razmotrimo sada te tvrdnje.

U početku bijaše grudica Planckove veličine

Krajem 1980-ih su Robert Brandenberger i Cumrun Vafa načinili prve, važne korake prema razumijevanju toga kako primjena tih svojstava teorije struna mijenja zaključke standardnog kozmološkog okvira. Došli su do dviju važnih spoznaja. Prvo, dok odvijamo sat unatrag kroz vrijeme prema

početku, temperatura se i dalje diže sve dok veličina svemira ne bude samo jedna Planckova duljina u svim smjerovima. No, tada temperatura dolazi do *maksimuma* i počinje se *smanjivati*. Razlog toga nije teško intuitivno pojmiti. Radi jednostavnosti, zamislite (kao Brandenberger i Vafa) da su sve prostorne dimenzije svemira kružne. Dok vrtimo sat unatrag i polumjer svih tih krugova se smanjuje, temperatura svemira se povećava. No dok se svi ti polumjeri urušavaju prema Planckovoj duljini i još dalje, znamo da je, unutar teorije struna, to fizikalno istovjetno tome da se polumjeri smanje do Planckove duljine i potom se počnu povećavati. Budući da se temperatura smanjivanjem svemira snižava, očekivali bismo da uzaludni pokušaj da se svemir stisne na veličinu manju od Planckove znači da temperatura dosegne maksimum i potom prestaje rasti te se počinje snižavati. Brandenberger i Vafa su detaljnim izračunima dokazali da je to doista tako.

To je dovelo Brandenbergera i Vafu do sljedeće kozmo-

loške slike. Na početku su sve prostorne dimenzije čvrsto uvijene do svog najmanjeg mogućeg opsega, što je otprilike Planckova duljina. Temperatura i energija su visoke, ali ne i beskonačne, jer teorija struna izbjegava slijepu ulicu beskonačno komprimirane početne točke nulte veličine. U tom, početnom trenutku svemira, sve prostorne dimenzije teorije struna posve su ravnopravne – u potpunosti su simetrične – sve su uvijene u multidimenzionalnu grudicu Planckove veličine. Tada, prema Brandenbergeru i Vafi, svemir prolazi kroz prvi stupanj smanjivanja simetrije, u kojemu se, otprilike u Planckovo vrijeme, tri prostorne dimenzije izdvajaju i šire, dok sve ostale zadržavaju svoju početnu, Planckovu veličinu. Te tri prostorne dimenzije tada se identificiraju s onima u inflacijskom kozmološkom scenariju, nastupa evolucija u postplankovskom vremenu, prikazana na slici 14.1, i te tri prostorne dimenzije šire se do današnjih razmjera.

Zašto tri?

Nameće se pitanje što pokreće smanjivanje simetrije koje izdvaja upravo tri prostorne dimenzije za širenje? Naime, osim empirijske činjenice da su se samo tri prostorne dimenzije proširile do uočljive veličine, nudi li teorija struna neki fundamentalan razlog zašto se nije proširio neki drugi broj dimenzija (četiri, pet, šest i tako dalje) ili, što bi bilo u većoj mjeri simetrično, zašto se nisu proširile sve prostorne dimenzije? Brandenberger i Vafa došli su do mogućeg objašnjenja. Prisjetimo se da dvojnost malenog/velikog polumjera u teoriji struna počiva na činjenici da, kad se dimenzija uvije poput kruga, oko nje se može omotati struna. Brandenberger i Vafa shvatili su da, poput gumenih vrpci omotanih oko unutarnje biciklističke gume, tako omotane strune stežu dimenzije koje okružuju i sprečavaju njihovo širenje. Na prvi pogled, to bi značilo da će sve dimenzije biti stegnute jer ih strune mogu sve omotati, pa to i čine.

biti stegnute jer ih strune mogu sve omotati, pa to i čine. Rupa se krije u tome što ako omotana struna i njena partnerica antistruna (pojednostavljeno rečeno, struna koja omata tu dimenziju suprotnom smjeru) dođu u doticaj, one će se brzo uzajamno anihilirati, a tako će nastati *neomotana* struna. Ako se ti procesi odviju dovoljno brzo i djelotvorno, nestat će dovoljno tog gumolikog stezanja da se dimenzije prošire. Brandenberger i Vafa sugerirali su da će to smanjivanje učinka stezanja obuhvatiti samo tri prostorne dimenzije. Evo i zašto.

Zamislimo da se dvije točkaste čestice gibaju jednodimenzionalnim pravcem kao što se prostire Crtozemska. Osim ako nekim slučajem nemaju jednaku brzinu, jedna će prije ili kasnije dostići drugu i one će se sudariti. No, uočimo da ako se te iste točkaste čestice nasumično valjaju po dvodimenzionalnoj ravnini, kao što se prostire Ravnozemska, vjerojatno je da se nikad neće sudariti. Druga prostorna dimenzija svakoj čestici otvara nov svijet putanja, koje se

većinom ne križaju u istom trenutku. U tri, četiri ili u bilo kojem većem broju dimenzija, postaje sve manje vjerojatno da će se dvije čestice ikad sresti. Brandenberger i Vafa shvatili su da analogna ideja vrijedi i ako točkaste čestice zamijenimo krugovima struna, omotanih oko prostornih dimenzija. Iako je to znatno teže vidjeti, ako postoje *tri* (ili manje) kružnih prostornih dimenzija, dvije omotane strune vjerojatno će se sudariti – što je analogija onoga što se događa dvjema česticama koje se gibaju jednom dimenzijom. Ali u četiri ili više prostornih dimenzija, sve je manje vjerojatno da će se omotane strune ikada sudariti – analogija onoga što se događa točkastim česticama u dvije ili više dimenzija.[4]

To nas vodi do sljedeće slike. U prvom trenutku svemira, visoka, ali konačna temperatura nagoni sve kružne dimenzije na to da se pokušaju širiti. Pritom, omotane strune sputavaju širenje i vraćaju dimenzije natrag u prvotne, Planckove polumjere. Međutim, prije ili kasnije će nasumične termalne fluktuacije natjerati tri dimenzije da na trenutak

postanu veće od drugih, a naša rasprava pokazuje da će se strune koje omotavaju te tri dimenzije vrlo vjerojatno sudariti. Oko pola tih sudara uključivat će parove struna/antistruna, a to će uzrokovati anihilacije koje trajno oslabljuju stezanje, pa će se te tri dimenzije i dalje širiti. Što se više

---

[4] Matematički obrazovanom čitatelju napominjemo da je osnova tog zaključka sljedeća: ako je zbroj prostorvremenskih dimenzija putanja koje opiše svaki od dva objekta veći od ili jednak prostorvremenskoj dimenziji arene kroz koju se gibaju, onda će se oni uglavnom presijecati. Na primjer, točkaste čestice opisuju jednodimenzionalne prostornovremenske putanje – zbroj prostornovremenskih dimezija za dvije takve putanje čestica stoga iznosi dva. Prostornovremenska dimenzija Crtozemske također je dva, te će se stoga njihove putanje uglavnom presijecati (uz pretpostavku da im brzine nisu posve jednake). Slično tome, strune opisuju dvodimenzionalne prostornovremenske putanje (svoje svjetske površine); dakle, za dvije strune zbroj iznosi četiri. To znači da će se strune koje se gibaju u četiri prostornovremenske dimenzije (tri prostorne i jednoj vremenskoj) uglavnom presijecati.

šire, to je manje vjerojatno da će se druge strune omotati oko njih jer je struni potrebno više energije da se omota oko veće dimenzije. I tako se ekspanzija hrani samom sobom te postaje sve manje ograničena kako se dimenzije sve više povećavaju. Sada možemo zamisliti da se te tri prostorne dimenzije i dalje razvijaju kako je opisano u prethodnim odjeljcima, sve dok ne dosegnu veličinu danas vidljivog svemira ili veću.

Kozmologija i Calabi-Yauovi oblici

Da bi pojednostavili stvari, Brandenberger i Vafa zamislili su da su sve prostorne dimenzije kružne. Zapravo, kao što smo napomenuli u poglavlju 8, ako su kružne dimenzije tako velike da se doista uvijaju same u sebe, ali izvan dosega naših današnjih promatranja, onda je kružni oblik konzistentan sa svemirom kakav opažamo. No, za dimenzije

koje ostaju malene, realističniji scenarij je onaj u kojem su uvijene u zamršeniji Calabi-Yauov prostor. Naravno, glavno pitanje glasi: koji Calabi-Yauov prostor? Kako je taj prostor određen? Na to pitanje nitko ne može odgovoriti. Ali, kombinacijom drastičnih rezultata koji mijenjaju topologiju, opisanih u prethodnom poglavlju, s tim kozmološkim spoznajama, možemo predložiti okvir u kojem bi se to moglo učiniti. Zbog konifoldnih prijelaza s cijepanjem prostora sada znamo da se svaki Calabi-Yauov oblik može razviti u svaki drugi. Stoga možemo zamisliti da u burnim, vrućim trenucima nakon praska uvijena Calabi-Yauova komponenta prostora ostaje malena, ali prolazi kroz grozničav ples u kojem se njezino tkivo kida i iznova spaja, uvijek iznova, brzo prolazeći kroz dug niz različitih Calabi-Yauovih oblika. Kako se svemir hladi i tri prostorne dimenzije povećavaju, prijelazi iz jednog u drugi Calabi-Yauov prostor se usporavaju, pri čemu se dodatne dimenzije na kraju stabiliziraju

u Calabi-Yauovom obliku koji, u optimističnoj varijanti, stvara fizikalna obilježja koja opažamo u svijetu oko sebe. Fizičari se suočavaju s izazovom da razumiju, i to detaljno, evoluciju Calabi-Yauove komponente prostora tako da se njegov današnji oblik može predvidjeti na temelju teorijskih načela. Uz novopronađenu sposobnost jednog Calabi-Yauovog prostora da glatko prelazi u drugi, vidimo da je pitanje odabira jednog Calabi-Yauovog prostora od mnogo njih zapravo kozmološko pitanje.[5]

Prije početka?

Kako nisu raspolagali egzaktnim jednadžbama teorije struna, Brandenberger i Vafa bili su u svojim kozmološkim proučavanjima prisiljeni služiti se brojnim aproksimacijama i pretpostavkama. Kako je nedavno rekao Vafa:

> Naš rad ističe nov način na koji nam teorija struna omo-

gućuje da počnemo razmatrati probleme koji se odupiru standardnom kozmološkom pristupu. Na primjer, vidimo da se u teoriji struna može izbjeći cijeli pojam početne singularnosti. No, zbog teškoća u obavljanju posve vjerodostojnih izračuna u tako ekstremnim situacijama uz naše današnje razumijevanje teorije struna, naš rad pruža tek prvi pogled u kozmologiju struna i vrlo je daleko od toga da bude posljednja riječ.[6]

Nakon njihova rada fizičari postojano napreduju i produbljuju razumijevanje kozmologije struna, a predvode ih,

---

5 Nakon otkrića M-teorije i pronalaska jedanaeste dimenzije, teoretičari struna počeli su proučavati načine uvijanja svih *sedam* dodatnih dimenzija tako da budu manje-više ravnopravne. Mogući izbori za takve sedmodimenzionalne mnogostrukosti poznati su kao Joyceove mnogostrukosti, po Domenicu Joyceu sa sveučilišta Oxford, koji je otkrio prve metode za njihovu matematičku konstrukciju.

6 Intervju s Cumrunom Vafom 12. siječnja 1998.

između ostalih, Gabriele Veneziano i njegov suradnik Maurizio Gasperini s Torinskog sveučilišta. Gasperini i Veneziano osmislili su svoju vlastitu, intrigantnu verziju kozmologije struna koja ima zajedničkih točaka s gore opisanim scenarijem, ali se i znatno razlikuje od njega. Kao i Brandenberger i Vafa, i oni se oslanjaju na minimalnu duljinu u teoriji struna kojom se izbjegava beskonačna temperatura i gustoća energije što nastaje u standardnoj i inflacijskoj kozmološkoj teoriji. No umjesto da zaključe da to znači da svemir počinje kao ekstremno vruća grudica Planckove veličine, Gasperini i Veneziano sugeriraju da bi svemir mogao imao cijelu pretpovijest – koja počinje mnogo prije onoga što zasad nazivamo nultim vremenom, a završava s plankovskim kozmičkim embrijem.

U tom takozvanom scenariju "prije velikog praska" svemir je na početku bio u znatno drukčijem stanju nego u teoriji velikog praska. Gasperini i Veneziano iznose pretpostavku da svemir nije bio krajnje vruć i čvrsto uvijen u sićušnu

prostornu mrljicu nego je počeo kao hladno i u biti *beskonačno* prostranstvo. Jednadžbe teorije struna tada naznačuju da – donekle kao u Guthovoj inflacijskoj epohi – dolazi do nestabilnosti koja nagoni sve točke u svemiru da se počnu brzo udaljavati jedna od druge. Gasperini i Veneziano pokazuju da je to prouzročilo da se prostor jače zakrivi, što je rezultiralo dramatičnim porastom temperature i gustoće energije.[7] Nakon nekog vremena, neko trodimenzionalno područje milimetarskih razmjera *unutar* toga golemog prostranstva moglo je izgledati upravo poput supervruće i guste točkice koja nastaje u Guthovom inflacijskom širenju. A tada, u standardnoj ekspanziji uobičajene kozmologije

---

[7] Stručan čitatelj primijetit će da se naš opis odvija u takozvanom referentnom sustavu struna, u kojemu sve veća zakrivljenost prije velikog praska nastaje (dilatacijom prouzročenim) porastom iznosa gravitacijske sile. U takozvanom Einsteinovom okviru evolucija se može opisati kao ubrzavajuća faza kontrakcije.

velikog praska, ta točkica postaje cijeli svemir koji poznajemo. Štoviše, budući da epoha prije velikog praska sadrži svoju vlastitu inflacijsku ekspanziju, Guthovo rješenje problema horizonta automatski je ugrađeno u kozmološki scenarij "prije velikog praska". Kao što je rekao Veneziano: "Teorija struna nudi nam verziju inflacijske kozmologije na pladnju."[8]

Proučavanje kozmologije superstruna brzo postaje aktivno i plodno polje istraživanja. Na primjer, scenarij "prije velikog praska" već je pokrenuo burnu, ali plodnu raspravu, i uopće nije jasno koju ulogu će imati u kozmološkom okviru koji će se na kraju pojaviti iz teorije struna. Hoće li se doći do tih kozmoloških spoznaja u velikoj mjeri ovisit će o sposobnosti fizičara da se nose sa svim aspektima druge revolucije superstruna. Na primjer, koje su kozmološke posljedice postojanja fundamentalnih višedimenzionalnih brana? Kako se mijenjaju kozmološka svojstva koja smo razmotrili ako teorija struna ima konstantu vezanja čija nas vrijednost

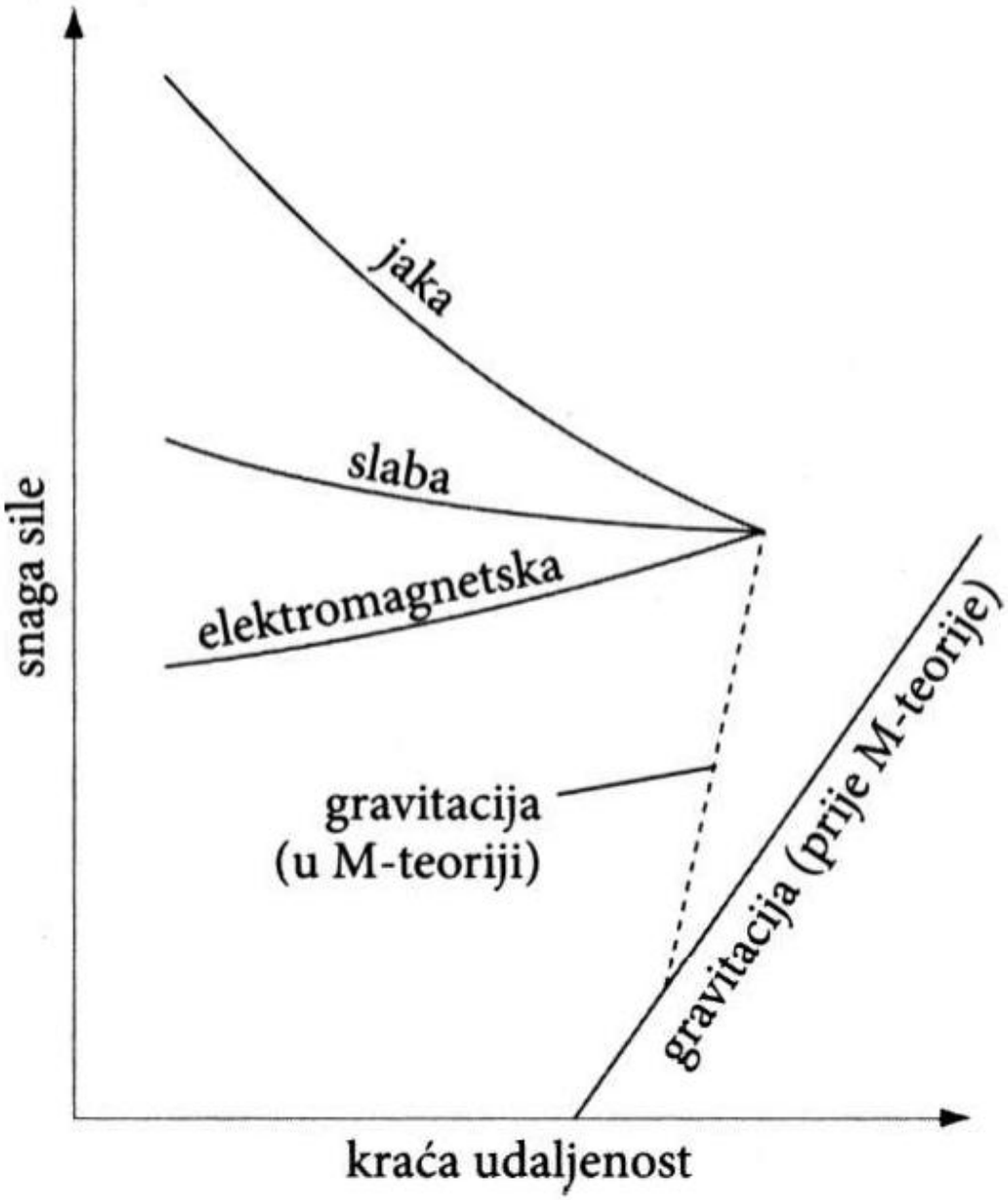
postavlja više prema središtu slike 12.11 nego u poluotočno područje? To jest, kakav je utjecaj potpuno razvijene M-teorije na prve trenutke svemira? Ta glavna pitanja danas se marljivo proučavaju. I već se pojavila jedna važna spoznaja.

M-teorija i spajanje svih sila

Na slici 7.1 pokazali smo kako se jakosti triju negravitacijskih sila spajaju kad je temperatura svemira dovoljno visoka. Kako se gravitacijska sila uklapa u tu sliku? Prije pojave M-teorije teoretičari struna uspjeli su dokazati da s najjednostavnijim odabirom Calabi-Yauove komponente prostora, gravitacijska sila gotovo da se stapa s ostale tri, ali ne u potpunosti, kao što je prikazano na slici 14.2. Teoretičari struna otkrili su da se nepoklapanje može izbjeći među ostalim

---

8 Intervju s Gabrieleom Venezianom 19 svibnja 1998.



Slika 14.2 Unutar M-teorije, iznosi svih četiriju sila mogu se pri-

rodno stopiti.

trikovima zanata, pažljivim oblikovanjem forme odabranog Calabi-Yauovog prostora, ali fizičarima je takvo naknadno fino podešavanje uvijek neugodno. Budući da trenutačno nitko ne zna kako predvidjeti precizan oblik Calabi-Yauovih dimenzija, čini se opasnim osloniti se na rješenja problema koja u tolikoj mjeri ovise o finim detaljima njihova oblika.

No, Witten je pokazao da druga revolucija superstruna nudi mnogo čvršće rješenje. Istražujući kako iznosi sila variraju kad konstanta vezanja struna nije nužno malena, Witten je pronašao da se krivulja gravitacijske sile može blago "pogurnuti" tako da se stopi s drugim silama, kao na slici 14.2, bez ikakva posebnog usavršavanja oblika Calabi-Yauovog dijela prostora. Iako je još prerano donijeti zaključak, to bi moglo značiti da se kozmološko jedinstvo lakše postiže kad primijenimo širi okvir M-teorije.

Napredak koji smo izložili u ovom i prethodnim odjeljcima predstavlja prve, pomalo nesigurne korake prema razu-

mijevanju kozmoloških implikacija teorije struna / M-teorije. U sljedećim godinama, dok budemo oštrili neperturbacijske alatke teorije struna / M-teorije, fizičari očekuju da će njihova primjena na kozmološka pitanja dati vrlo duboke spoznaje.

No iako trenutačno nemamo dovoljno djelotvorne metode da bismo u potpunosti razumjeli kozmologiju u skladu s teorijom struna, bilo bi dobro razmisliti o nekim općim temama u vezi s mogućom ulogom kozmologije u potrazi za konačnom teorijom. Upozoravamo na to da su neke od tih zamisli spekulativnije prirode od onih o kojima smo prethodno raspravljali, ali one postavljaju pitanja na koja bi svaka konačna teorija morala odgovoriti.

Kozmološka spekulacija i konačna teorija

Kozmologija utječe na nas iznutra, duboko, jer je razumijevanje *kako* su stvari nastale – barem za neke – ono što

je najbliže razumijevanju *zašto* su nastale. To ne znači da moderna znanost stvara povezanost između pitanja kako i pitanja zašto – ona to ne čini – i moglo bi biti da se nikakva znanstvena povezanost nikada ni ne nađe. Ali proučavanje kozmologije nam ne obećava pružiti najpotpunije razumijevanje onoga zašto – nastanak svemira – a to barem omogućuje znanstveno oblikovano gledište na okvir u kojemu se postavljaju pitanja. Katkad je poznavanje pitanja naša najbolja zamjena za odgovaranje na njega.

U kontekstu potrage za konačnom teorijom, te uzvišene refleksije o kozmologiji ustupaju pred mnogo konkretnijim razmatranjima. Način na koji nam se stvari u svemiru danas pokazuju – na krajnjoj desnoj strani vremenskog pravca na slici 14.1 – ovisi o fundamentalnim zakonima fizike, naravno, ali mogla bi ovisiti i o nekim aspektima kozmološke evolucije, s krajnje lijeve strane vremenskog pravca, koje možda leže izvan dosega čak i najdublje teorije.

Nije teško zamisliti kako bi to moglo biti. Zamislimo što se događa, na primjer, kad bacimo loptu u zrak. Zakoni gravitacije vladaju daljnjim gibanjem lopte, ali ne možemo samo na temelju tih zakona predvidjeti gdje će lopta pasti. Moramo znati i brzinu lopte – njezin iznos i smjer – u trenutku kad se odvojila od vaše ruke. to jest, moramo znati *početne uvjete* gibanja lopte. Slično tome, postoje svojstva svemira koja također imaju povijesnu kontingenciju – razlog zašto se zvijezda formirala ovdje, ili planet ondje, ovisi o zamršenom lancu događaja koji, barem u načelu, možemo pratiti sve do samog početka svemira. No, moguće je da još osnovnija svojstva svemira, možda čak i svojstva fundamentalnih čestica tvari i sila, također izravno ovise o povijesnom razvoju – razvoju koji i sam ovisi o početnim uvjetima svemira.

Zapravo, već smo spomenuli jednu od mogućih inkarnacija te ideje u teoriji struna: dok se vrući, rani svemir razvijao, dodatne dimenzije možda su se mijenjale iz jednog

oblika u drugi, te se na kraju odlučio za jedan, konkretan Calabi-Yauov prostor kad su se stvari dovoljno ohladile. Ali, poput lopte bačene u zrak, rezultat tog putovanja kroz brojne Calabi-Yauove oblike mogao bi ovisiti o pojedinostima o tome kako je putovanje uopće počelo. A po utjecaju rezultirajućeg Calabi-Yauovog oblika na mase čestica i na svojstva sila vidimo da kozmološka evolucija i stanje svemira na samom početku mogu znatno utjecati na fizikalne zakone koje danas opažamo.

Ne znamo kakvi su bili početni uvjeti u svemiru, a ne znamo čak ni ideje, pojmove i jezik kojim bi ih se moglo opisati. Vjerujemo da je silovito početno stanje *beskonačne* energije, gustoće i temperature koje nastaje prema standardnom i inflacijskom kozmološkom modelu zapravo znak da su se te teorije urušile, a ne ispravan opis fizikalnog stanja koje je doista postojalo. Teorija struna nudi poboljšanje tako što pokazuje kako se može izbjeći te beskonačnosti; no

ipak, još nitko ništa ne zna o pitanju kako su stvari doista počele. Zapravo, naše neznanje opstaje i na još višoj razini: ne znamo je li uopće razumno postaviti pitanje određivanja početnih uvjeta i nije li to pitanje zauvijek izvan dosega svake teorije – kao da od opće teorije relativnosti zatražite da vam odgovori na pitanje koliko jako ste bacili loptu u zrak. Marljivi pokušaji fizičara kao što su Hawking i James Hartle s Kalifornijskog sveučilišta u Santa Barbari trebali su dovesti pitanje početnih uvjeta svemira pod kišobran fizikalne teorije, ali svi ti pokušaji ostali su nejasnog ishoda. U kontekstu teorije struna / M-teorije, naše kozmološko razumijevanje zasad je jednostavno previše primitivno da bismo odredili je li naša kandidatkinja za "teoriju svega" doista dostojna tog naziva, u kojem slučaju određuje svoje vlastite početne kozmološke uvjete i tako im daje status zakona fizike. To je glavno pitanje za buduća istraživanja.

No tu ipak nije riječ samo o pitanjima početnih uvjeta i njihovom utjecaju na iz njih nastale povijesne meandre koz-

mičke evolucije, neke novije spekulacije razmatraju i druge potencijalne granice eksplanatorne moći svake konačne teorije. Nitko ne zna jesu li te zamisli istinite ili pogrešne, jer su one zasad na samim rubovima znanosti glavne struje. No one ističu – iako na prilično provokativan i spekulativan način – prepreku koju mora svladati svaka konačna teorija.

Osnovna ideja oslanja se na sljedeću mogućnost. Zamislimo da je ono što nazivamo univerzumom zapravo samo sićušan dio mnogo šireg kozmološkog prostranstva, jedan od golemog broja otočnih svemira, raspršenih u veličanstvenom kozmološkom arhipelagu. Iako bi se to moglo doimati prilično nategnutim – a na kraju bi se moglo pokazati da i jest tako – Andrej Linde predložio je konkretan mehanizam koji bi mogao stvoriti taj gargantuovski univerzum. Linde je otkrio da kratak, ali presudan bljesak inflacijske ekspanzije o kojem smo prije govorili možda nije bio jedinstven, jednokratan događaj. Kao on tvrdi, uvjeti za inflacijsko širenje

mogli su se steći više puta u odvojenim područjima, raspršenim diljem svemira, nakon čega svako širenje prolazi kroz svoje inflacijsko napuhavanje i razvija se u nov, poseban univerzum. A u svakom od tih univerzuma taj proces se nastavlja; u dalekim, zabačenim zakucima starog svemira niču novi, i stvaraju beskrajnu mrežu kozmičkih prostranstava u bujanju. Terminologija postaje pomalo nespretna, ali pratimo modu i nazovimo taj prošireni pojam univerzuma *multiverzumom*, pri čemu se svaki njegov sastavni dio naziva univerzum.

Glavna napomena glasi: iako smo u poglavlju 7 istaknuli da sve što znamo upućuje na to da su zakoni fizike dosljedni i jednoliki u cijelom univerzumu, to ne mora vrijediti za fizikalne atribute u tim drugim univerzumima, sve dok su oni odvojeni od nas, ili barem tako daleko da njihova svjetlost nije imala vremena doći do nas. I tako možemo zamisliti da fizika varira od jednog univerzuma do drugog. U nekima od njih razlike su možda neznatne: na primjer, masa elek-

od njih razlike su možda neznatne. Na primjer, masa elektrona ili iznos jake sile mogli bi biti tisućinku postotka veći ili manji nego u našem univerzumu. U drugima se fizika može znatnije razlikovati: gornji kvark mogao bi težiti deset puta više nego u našem univerzumu, ili bi iznos elektromagnetske sile moglao biti deset puta veći od vrijednosti koju mi mjerimo, uza sve teške posljedice koje to ima po zvijezde i život kakav poznajemo (kao što smo naznačili u poglavlju 1). A u drugim univerzumima fizika se može razlikovati još dramatičnije: popis elementarnih čestica i sila mogao bi biti posve drukčiji od našeg, ili, u kontekstu teorije struna, čak i broj protežnih dimenzija mogao bi biti drukčiji: neki zagušeni univerzumi mogli bi imati čak samo nula ili jednu veliku prostornu dimenziju, dok bi drugi prostrani univerzumi mogli imati osam, devet ili čak deset protežnih prostornih dimenzija. Pustimo li mašti na volju, čak i sami zakoni mogli bi se drastično razlikovati od jednog univerzuma do drugog. Mogućnosti su beskonačne.

Evo u čemu je stvar. Bacimo li pogled na taj golem labirint univerzuma, velika većina njih neće imati uvjete pogodne za život, pa ni za nešto izdaleka slično životu kakav poznajemo. Kad je riječ o drastičnim promjenama poznate nam fizike, to je posve jasno: kad bi naš univerzum uistinu izgledao poput univerzuma vrtnoga crijeva, život kakav poznajemo ne bi postojao. No čak i prilično konzervativne promjene zakona fizike bi, na primjer, omele formaciju zvijezda, poremetivši njihovu sposobnost da djeluju kao kozmičke visoke peći gdje se sintetiziraju kompleksni atomi koji podržavaju život, kao što su ugljik i kisik, a obično ih svemirom raspršuju eksplozije supernova. U svjetlu te ovisnosti života o fizikalnim pojedinostima, ako sada pitamo, na primjer, zašto prirodne sile i čestice imaju upravo ona svojstva koja opažamo, pomalja se mogući odgovor: diljem cijelog multiverzuma, ta svojstva znatno variraju; njihova svojstva *mogu* biti drukčija i *jesu* drukčija u drugim univerzumima. Ono što je posebno za konkretnu kombinaciju svojstava če-

stica i sila koju opažamo jest, naravno, to što je omogućila nastanak života. A život, posebice inteligentan život, preduvjet je čak i da bi se uopće moglo postaviti pitanje zašto naš univerzum ima svojstva koja ima. Govoreći jednostavnim jezikom, stvari u našem univerzumu su onakve kakve jesu jer kad ne bi bile, ne bi bilo nas da to primijetimo. Poput pobjednika u golemoj igri ruskoga ruleta, čija se iznenađenost time što su pobijedili umanjuje zbog toga što znaju da, u slučaju da nisu pobijedili, ne bi bili stanju *ne osjećati* iznenađenost, hipoteza o multiverzumu mogla bi umanjiti našu želju za objašnjenjem zašto naš univerzum izgleda upravo onako kako izgleda.

Taj argument je verzija ideje koja već ima dugu povijest, a naziva se antropsko načelo. Kako smo ga ovdje predstavili, to gledište dijametralno je suprotno snu o krutoj, potpuno predvidljivoj, ujedinjenoj teoriji u kojoj su stvari kakve jesu zato što univerzum ne bi ni mogao biti drukčiji. Umjesto da

bude vrhunac poetske ljepote u kojoj se sve uklapa s nepobitnom elegancijom, multiverzum i antropsko načelo pružaju sliku neumjereno bogate zbirke univerzuma s nezasitnim apetitom prema raznolikosti. Bit će krajnje teško, ako ne i nemoguće, ikada doznati je li priča o multiverzumima istinita. Čak i ako postoje drugi univerzumi, možemo zamisliti da nikada ne bismo uspjeli stupiti u doticaj ni s jednim od njih. No tim golemim povećanjem opsega "onoga što postoji" – slično Hubbleovoj spoznaji da je Mliječni Put samo jedna od mnoštva galaksija – pojam multiverzuma barem nas upozorava na mogućnost da od konačne teorije zahtijevamo previše.

Trebali bismo zahtijevati da naša konačna teorija ponudi kvantnomehanički konzistentan opis svih sila i sve materije. Trebali bismo zahtijevati da naša konačna teorija pruži uvjerljivu kozmologiju za naš univerzum. Međutim, ako je priča o multiverzumima ispravna – a to je veliki *ako* – onda je možda previše tražiti od naše teorije da objasni i detalina

svojstva masa i naboja čestica, kao i naboja sila.

No, moramo naglasiti da, čak i ako prihvatimo spekulativnu premisu o multiverzumu, zaključak da ona umanjuje našu sposobnost predviđanja ipak nije najčvršće utemeljen. Razlog tome, jednostavno rečeno, krije se u tome što bismo, ako pustimo mašti na volju i udubimo se u kontemplaciju o multiverzumu, trebali pustiti i teoriju s lanca te kontemplirati i kako bi se moglo ukrotiti prividnu nasumičnost multiverzuma. U jednoj, relativno konzervativnoj kontemplaciji mogli bismo zamisliti da bismo – kad bi slika o multiverzumu bila istinita – mogli proširiti svoju konačnu teoriju do punog opsega, tako da nam "proširena konačna teorija" precizno kaže zašto i kako su vrijednosti fundamentalnih parametara raspršene po pojedinačnim univerzumima.

Radikalnija kontemplacija krije se u prijedlogu koji je iznio Lee Smolin sa sveučilišta Penn State. Nadahnut sličnošću uvjeta u vrijeme velikog praska i u središtu crnih rupa

– i jedne i druge obilježava kolosalna gustoća zbijene materije – Smolin je izložio ideju da je svaka crna rupa sjeme novog univerzuma koji nastaje svojim velikim praskom – ali od našeg pogleda zauvijek je skriven horizontom događaja crne rupe. Osim što je predložio drugi mehanizam za nastanak multiverzuma, Smolin je dodao nov element – kozmičku verziju genske mutacije – koji razrješava znanstvena ograničenja povezana s antropskim načelom.[9] On predlaže: zamislimo da su, kad univerzum iznikne iz jezgre crne rupe, njegovi fizikalni atributi, poput masa čestica i iznosa sila, slični, ali ne i jednaki onima u univerzumu-roditelju. Budući da crne rupe nastaju od ugašenih zvijezda, a formiranje zvijezda ovisi o konkretnim vrijednostima mase čestica i snage sila, plodnost svakog današnjeg univerzuma – broj crnih rupa potomaka koje može dati – ovisi prije svega o tim parametrima. Male varijacije u parametrima univerzuma-potomaka stoga će dovesti do toga da su neki od njih prikladniji za stvaranje crnih rupa nego što je to univer-

zum-roditelj te imaju još veći broj svojih univerzuma-potomaka.[10] Nakon mnogo "generacija", potomci univerzuma optimiziranih za nastajanje crnih rupa stoga će biti tako brojni da će prevladati u populaciji multiverzuma. I tako, umjesto da se poziva na antropsko načelo, Smolinov prijedlog nudi dinamički mehanizam koji, u prosjeku, parametre

---

9 Smolinove zamisli izložene su u njegovoj knjizi *The Life of the Cosmos* (New York: Oxford University Press, 1997).

10 U teoriji struna, na primjer, tu evoluciju pokretat će malene promjene oblika uvijenih dimenzija iz jednog univerzuma u njegove potomke. Po rezultatima o konifoldnim prijelazima s cijepanjem prostora znamo da nas dovoljno dugačak niz tako malenih promjena može voditi iz jednog Calabi-Yauovog prostora u drugi, omogućujući multiverzumu da uzorkuje reproduktivnu efikasnost svih univerzuma baziranih na strunama. Kad multiverzum prođe kroz dovoljan broj stupnjeva reprodukcije, prema Smolinovoj hipotezi očekivali bismo da će tipičan univerzum imati Calabi-Yau komponentu koja je optimizirana za plodnost.

svake sljedeće generacije sve više približava određenim vrijednostima – upravo onima koje su optimalne za nastajanje crnih rupa.

Taj pristup pruža drugu metodu, čak i u kontekstu multiverzuma, u kojoj se može objasniti fundamentalne parametre materije i sila. Ako je Smolinova teorija točna, i ako smo mi tipičan član zrelog multiverzuma (to su velika "ako" i može ih se dovesti u pitanje na mnogo načina), parametri čestica i sila koje mjerimo trebali bi biti optimizirani upravo za nastajanje crnih rupa. Dakle, svaka promjena tih parametara našeg univerzuma trebala bi značiti da je crnim rupama nastajanje otežano. Fizičari su počeli istraživati to predviđanje, ali zasad nisu došli do jedinstvenog mišljenja o njegovoj valjanosti. No čak i ako se pokaže da je Smolinova teorija pogrešna, ona je primjer još jednog oblika koji bi konačna teorija mogla poprimiti. Konačnoj teoriji moglo bi na prvi pogled nedostajati krutosti. Možda ćemo otkriti da može opisivati obilje univerzuma, od kojih većina nije rele-

vantna za onaj koji mi nastanjujemo. Štoviše, mogli bismo zamisliti da se to obilje univerzuma može fizikalno ostvariti i tako tvoriti multiverzum – nešto što na prvi pogled zauvijek ograničava našu moć predviđanja. Zapravo, ova rasprava ilustrira da tek treba doći do konačnog objašnjenja, i to samo ako spoznamo ne samo konačne zakone nego i njihove implikacije za kozmološku evoluciju, u neočekivano velikim razmjerima.

Kozmološke implikacije teorije struna / M-teorije bit će glavno područje istraživanja u dvadesetprvom stoljeću. Budući da nemamo akceleratore čestica koji bi mogli proizvesti Planckovu energiju, empirijske podatke morat ćemo sve više tražiti u kozmološkom akceleratoru velikog praska i ostacima koje nam je ostavio diljem svemira. Budemo li ustrajni, i uz malo sreće, možda ćemo na kraju moći odgovoriti na pitanja o tome kako je svemir nastao i zašto se razvio u oblik koji gledamo na nebu i na zemlji. Naravno, još je mnogo ne-

istražena teritorija između mjesta gdje smo sada i prostranstava na kojima se kriju odgovori na ta temeljna pitanja. No razvoj kvantne teorije gravitacije u okviru teorije superstruna pruža nadu da danas posjedujemo teorijska sredstva za putovanje prostranim područjima nepoznatoga i, zasigurno nakon mnogih borbi, možda ćemo otkriti odgovore na neka od najdubljih ikad postavljenih pitanja.

5. DIO

UJEDINJENJE U DVADESETPRVOM STOLJEĆU

PETNAESTO POGLAVLJE

Izgledi

Za nekoliko stoljeća, teorija superstruna, ili njezina evolucija unutar M-teorije, možda će se tako razviti u odnosu na našu sadašnju formulaciju da je čak ni današnji vodeći istraživači ne bi mogli prepoznati. Tražeći konačnu teoriju, možda ćemo otkriti da je teorija struna samo jedan od mnogih presudnih koraka na putu prema daleko široj

koncepciji kozmosa – koncepciji koja uključuje ideje koje se znatno razlikuju od svega što smo dosad poznavali. Povijest znanosti uči nas da kad god pomislimo da smo sve shvatili, priroda iz rukava izvuče neko radikalno iznenađenje koje zahtijeva značajne, a katkad i drastične promjene našeg poimanja svijeta. No ipak, odlučimo li se praviti važnima, mogli bismo zamisliti, kao što su naivno činili i mnogi prije nas, da upravo sada živimo u presudnom razdoblju povijesti čovječanstva, u kojemu će se napokon dovršiti potraga za konačnim zakonima univerzuma. Kako je to rekao Edward Witten:

> Osjećam da smo se s teorijom struna toliko približili cilju da – u trenucima najvećeg optimizma – zamišljam kako bi konačan oblik teorije svakog dana mogao pasti s neba nekome u krilo. No, kad sam raspoložen realistično, smatram da smo sada u procesu gradnje mnogo dublje teorije od svake druge koju smo ikada imali, i negdje u dvadesetprvom stoljeću, kad budem prestar da bih mogao imati ikakve korisne misli o toj

temi, mlađi fizičari morat će odlučiti jesmo li doista otkrili konačnu teoriju.[1]

Iako još osjećamo potrese izazvane drugom revolucijom superstruna i apsorbiramo splet novih spoznaja koje ona sadrži, teoretičari struna većinom se slažu da će nam vjerojatno morati biti potreban i treći, pa čak i četvrti takav teorijski preokret kako bismo oslobodili punu snagu teorije struna i donijeli zaključak o tome možemo li joj dodijeliti ulogu konačne teorije. Kao što smo vidjeli, teorija struna već je ponudila novu sliku mehanizma svemira, ali postoje i značajne prepreke i neriješena pitanja koja će zasigurno biti meta istraživanja teoretičara struna u dvadesetprvom stoljeću. Zato u ovom, posljednjem poglavlju nećemo moći dovršiti priču o potrazi čovječanstva za najdubljim zakonima svemira, jer ta potraga još traje. Umjesto toga, uputimo pogled u budućnost teorije struna i raspravimo o pet glavnih pitanja s kojima će se teoretičari struna suočiti u daljnjoj potrazi za konačnom teorijom.

Koje je glavno načelo u osnovi teorije struna?

Najvažnija lekcija koju smo naučili u prošlom stoljeću glasi da su poznati nam fizikalni zakoni povezani s načelima simetrije. Specijalna teorija relativnosti temelji se na simetriji utjelovljenoj u načelu relativnosti – simetriji između svih motrišta koja se gibaju jednoliko. Gravitacijska sila, koju utjelovljuje opća teorija relativnosti, temelji se na načelu ekvivalencije – što je proširenje načela relativnosti koje obuhvaća sva moguća motrišta bez obzira na zamršenost njihova gibanja. A jaka, slaba i elektromagnetska sila temelje se na apstraktnijim načelima baždarne simetrije.

Kao što smo rekli, fizičari vole uzvisiti načela simetrije i dati im istaknuto mjesto - i ne samo to, nego ih postavlja-

---

1 Intervju s Edwardom Wittenom, 4. ožujka 1998.

ju na pijedestal objašnjenja. Prema tom gledištu, gravitacija uopće i *postoji* kako bi sva moguća motrišta bila posve ravnopravna – to jest, kako bi se održalo načelo ekvivalencije. Slično tome, negravitacijske sile postoje kako bi priroda poštovala s njima povezane baždarne simetrije. Naravno, u tom pristupu se pitanje zašto neka sila postoji pretvara u pitanje zašto priroda poštuje s njom povezano načelo simetrije. No, to se ipak doima poput svojevrsnog napretka, posebno kad je simetrija o kojoj je riječ čini eminentno prirodnom. Na primjer, zašto bismo referentni sustav jednog promatrača tretirali drukčije nego nekog drugog? Čini se prirodnijim da za zakone univerzuma sva motrišta budu ravnopravna; to se postiže načelom ekvivalencije i uvođenjem gravitacije u strukturu svemira. Premda moramo dobro znati matematiku da bismo to mogli cijeniti, kao što smo naznačili u poglavlju 5, slična je logika u osnovi baždarnih simetrija u trima negravitacijskim silama.

Teorija struna vodi nas još jednu stepenicu niže na lje-

stvici eksplanatorne dubine jer sva ta načela simetrije, kao i još jedno – supersimetrija – izranjaju iz njezine strukture. Zapravo, da je povijest pošla drukčijim tijekom – i da su fizičari otkrili teoriju struna još prije stotinjak godina – mogli bismo očekivati da bi proučavajući njezina svojstva otkrili sva ta načela simetrije. No, imajmo na umu da, iako nam načelo ekvivalencije nudi određeno razumijevanje pitanja zašto postoji gravitacija, a baždarne simetrije daju nam određen dojam o tome zašto postoje negravitacijske sile, u kontekstu teorije struna te simetrije su tek *posljedice*; premda se njihova važnost nimalo ne umanjuje, one su dio konačnog proizvoda mnogo šire teorijske strukture.

U toj raspravi oštro se ističe sljedeće pitanje: je li i sama teorija struna neizbježna posljedica nekog šireg načela – možda načela simetrije, ali ne nužno – na isti način kao što načelo ekvivalencije neizbježno vodi do opće teorije relativnosti, a baždarne simetrije do negravitacijskih sila? Zasad

nitko nema odgovor na to pitanje. Da bismo shvatili koliko je ono važno, dovoljno je zamisliti Einsteina kako pokušava formulirati opću teoriju relativnosti a da nije sretnim slučajem u patentnom uredu u Bernu 1907. nadošao na misao koja ga je dovela do načela ekvivalencije. Bez te, presudne spoznaje opću relativnost ne bi bilo nemoguće formulirati, ali zacijelo bi bilo vrlo teško. Načelo ekvivalencije pruža sažet, sistematski i plodan organizacijski okvir za analizu gravitacijske sile. Na primjer, opis opće relativnosti koji smo dali u poglavlju 3 oslanja se uglavnom na načelo ekvivalencije, a njegova uloga u punom matematičkom formalizmu teorije još je i važnija.

Teoretičari struna danas su u položaju u kojem bi bio Einstein da nije raspolagao načelom ekvivalencije. Još od 1968, kad je Veneziano nadošao na svoju sretnu zamisao, teorija se sastavlja komad po komad, otkriće po otkriće, revoluciju po revoluciju. No, glavno organizacijsko načelo koje obuhvaća ta otkrića i sva druga svojstva teorije u jednom

opsežnom i sustavnom okviru – okviru u kojem svaki pojedinačni sastojak postoji po apsolutnoj nužnosti – još nam izmiče. Otkriće tog načela označilo bi presudan trenutak u razvoju teorije struna, jer bismo tada vjerojatno vidjeli mehanizam teorije s nikad dosad dosegnutom jasnoćom. Naravno, nema jamstva da takvo, fundamentalno načelo uopće postoji, ali razvoj fizike proteklih stotinu godina ohrabruje teoretičare struna da se usrdno nadaju. U razmatranju sljedećeg stupnja razvoja teorije struna, od najveće je važnosti pronaći njezino "načelo neizbježnosti" – onu osnovnu ideju iz koje nužno nastaje cijela teorija.[2]

---

[2] Neki teoretičari vide naznaku te ideje u holografskom načelu, koncepciji koju su osmislili Susskind i ugledni nizozemski fizičar Gerard't Hooft. Kao što hologram može reproducirati *tro*dimenzionalnu vizualnu sliku sa posebno konstruiranog *dvo*dimenzionalnog filma, tako su Susskind i 't Hooft predložili da bi sva fizikalna događanja na koja nailazimo zapravo mogla biti u cjelini kodirana u jednadžbama definiranima u nižedimenzionalnom svijetu. Iako

Što su prostor i vrijeme, i možemo li i bez njih?

U mnogim prethodnim poglavljima slobodno smo se služili pojmovima prostora i prostorvremena. U poglavlju 2 opisali smo Einsteinovu spoznaju da su prostor i vrijeme nerazmrsivo isprepleteni neočekivanom činjenicom da gibanje predmeta kroz prostor utječe na njegovo prolaženje kroz vrijeme. U poglavlju 3 produbili smo razumijevanje uloge prostorvremena u evoluciji svemira uz pomoć opće teorije relativnosti, koja pokazuje da precizan oblik tkiva prostorvremena prenosi gravitacijsku silu s mjesta na mjesto. Silovito kvantno titranje u mikroskopskoj strukturi tkiva, kao što smo raspravili u poglavljima 4 i 5, određuje potrebu za novom teorijom, što nas vodi do teorije struna. I na kraju, u

---

to može zvučati jednako čudno kao da pokušavate nacrtati nečiji portret promatrajući samo njegovu sjenu, možemo dobiti dojam o tome što to znači, i razumjeti dio Susskindove i 't Hooftove mo-

tivacije, prisjetimo li se rasprave o entropiji crnih rupa iz poglavlja 13. Kao što je ondje navedeno, entropija crne rupe određena je površinom njezina horizonta događaja – a ne ukupnim obujmom prostora koji horizont događaja obuhvaća. Dakle, nered crne rupe, a stoga i informacije koju ona utjelovljuje, kodirani su u *dvo*dimenzionalnim podacima površine. Gotovo kao da horizont događaja crne rupe djeluje kao hologram, tako što zahvaća sav informacijski sadržaj trodimenzionalne unutrašnjosti crne rupe. Susskind i 't Hooft poopćili su tu ideju na cijeli univerzum predloživši da je sve što se događa u "unutrašnjosti" univerzuma tek odraz podataka i jednadžbi definiranih na udaljenoj, obuhvatnoj površini. Noviji rad harvardskog fizičara Juana Maldacene, kao i važni kasniji radovi Wittena i princetonskih fizičara Stevena Gubsera, Igora Klebanova i Aleksandra Poljakova pokazali su da, barem u nekim slučajevima, *teorija struna utjelovljuje holografsko načelo*. Na način koji se danas žustro istražuje, čini se da fizika univerzuma kojim vlada teorija struna ima ekvivalentan opis koji uključuje samo fiziku koja se odvija na takvoj, obuhvatnoj površini – površini koja nužno ima manje dimenzija od unutrašnjosti. Neki teoretičari struna sugeriraju da bi potpuno razumijevanje holografskog načela i njegove uloge u teoriji struna moglo dovesti do treće revolucije superstruna.

nekoliko sljedećih poglavlja, vidjeli smo kako teorija struna proglašava da svemir ima mnogo više dimenzija nego što smo ih svjesni, a neke od njih su uvijene u sićušne, ali zamršene oblike koji mogu prolaziti kroz čudesne preobrazbe u kojima se njihovo tkivo buši, cijepa i zakrpava.

Grafičkim prikazima na slikama 3.4, 3.6 i 8.10 pokušali smo ilustrirati te zamisli tako što smo zamislili tkivo prostora i prostorvremena kao da je donekle slično tkanini od koje se kroji svemir. Te slike mogu objasniti mnogo toga: fizičari se u svom stručnom radu redovito služe njima kao vizualnim pomagalom. Premda proučavanje takvih crteža postupno pruža dojam smisla, i dalje se možemo pitati: što *doista* podrazumijevamo pod tkivom svemira?

To je duboko pitanje, o kojem se, u ovom ili onom obliku, raspravlja već stotinama godina. Newton je objavio da su prostor i vrijeme vječni i nepromjenjivi konstituenti svemira, čiste strukture onkraj svakog pitanja i objašnjenja. U svojim *Principia* napisao je: "Apsolutni prostor, po svo-

joj prirodi, ne odnoseći se ni na što izvanjsko, ostaje uvijek sličan sebi i nepomičan. Apsolutno, istinsko i matematičko vrijeme, po sebi i svojoj prirodi, teče jednako, ne odnoseći se ni prema čemu izvanjskome."[3] Gottfried Leibniz i drugi odlučno su se suprotstavili i ustvrdili da su prostor i vrijeme tek knjigovodstvena sredstva za praktično bilježenje odnosa između predmeta i događaja u univerzumu. Lokacija predmeta u prostoru i vremenu ima smisla samo u usporedbi s nekim drugim. Prostor i vrijeme su rječnik tih odnosa, ali ništa više od toga. Premda je Newtonovo gledište prevladavalo više od dva stoljeća, potkrijepljeno empirijski uspješnima trima zakonima gibanja, Leibnizova koncepcija, koju je dalje razvio austrijski fizičar Ernst Mach, mnogo je bliža slici koju danas imamo. Kao što smo vidjeli, Einsteinova

---

[3] *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, prev. Motte i Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), sv. I, str. 6.

specijalna i opća teorija relativnosti odlučno su odbacile koncepciju o apsolutnom i univerzalnom poimanju prostora i vremena. No, i dalje možemo pitati je li geometrijski model prostorvremena koji igra tako važnu ulogu i u općoj relativnosti i u teoriji struna samo praktičan stenografski zapis prostornih i vremenskih odnosa između raznih lokacija, ili bismo pak, kad govorimo da smo uronjeni u tkivo prostorvremena, trebali vidjeti sebe kao bića koja su uistinu ugrađena u *nešto.*

Iako smo se time upustili na teritorij spekulacija, teorija struna ipak pruža odgovor na to pitanje. Graviton, najmanji paketić gravitacijske sile, jedan je od osobitih modela titranja struna. Upravo kao što se elektromagnetsko polje, na primjer, vidljive svjetlosti, sastoji od golema broja fotona, tako se i gravitacijsko polje sastoji od golema broja gravitona – to jest, golema broja struna koje titraju u skladu s vibracijskim modelom gravitona. Gravitacijska polja su pak kodirana zakrivljenošću tkiva prostorvremena, te smo sto-

ga i samo tkivo prostorvremena poistovjetili s kolosalnim brojem struna koje sve titraju po istom, gravitonskom modelu. Rečeno jezikom poljâ, tako golemo, organizirano polje slično titrajućih struna poznato je kao *koherentno stanje* struna. To je prilično poetična slika – strune u teoriji struna nalik su nitima u tkanju prostorvremena – ali trebali bismo napomenuti da njezino strogo značenje tek treba do kraja razraditi.

No ipak, taj opis prostorvremena, tom usporedbom s tkanjem, navodi nas na sljedeće pitanje. Obična tkanina konačan je proizvod nekoga tko je pomnjivo upletao pojedinačne niti, sirovinu uobičajene tkanine. Slično tome, možemo se zapitati postoji li slična "sirovina" i za tkanje prostorvremena – konfiguracija struna u kozmičkom tkanju u kojoj se one još nisu razvile u organizirani oblik koji prepoznajemo kao prostorvrijeme. Napominjemo da je zapravo neprikladno prikazati to stanje kao zapetljanu masu pojedinačnih ti-

trajućih struna koje se tek trebaju uplesti u urednu cjelinu, jer se tako, u našem uobičajenom načinu razmišljanja, unaprijed pretpostavlja pojam i prostora i vremena – prostora u kojemu struna titra i protoka vremena u kojemu pratimo promjene njezina oblika iz trenutka u trenutak. No, u sirovom stanju, prije nego što se strune koje tvore kozmičko tkanje postave u koherentan raspored i otpočnu svoj titrajni ples koji proučavamo, *prostor i vrijeme još se uopće ne ostvaruju*. Čak i naš jezik odveć je grub za te misli, jer zapravo još ne postoji ni pojam *prije*. U nekom smislu, to je kao da su pojedinačne strune "krhotine" prostora i vremena, i uobičajeni pojmovi prostora i vremena nastaju tek kada one skladno zatitraju.

Zamišljati tako nestrukturirano, primordijalno stanje postojanja, u kojemu ne postoje pojmovi prostora i vremena kakve poznajemo – to iskušava granice razumijevanja većine ljudi (među kojima sam i ja). Poput dosjetke Stephena Wrighta o fotografu koji je opsjednut željom da fotografi-

ra horizont izbliza, i mi nailazimo na sukob paradigmi kad pokušamo zamisliti svemir koji *jest*, ali nekako mu pojmovi prostora i vremena nisu potrebni. No ipak, vjerojatno ćemo se morati pomiriti s takvim poimanjima i razumjeti njihovu primjenu kako bismo mogli u cjelini razumjeti teoriju struna. Razlog tome je to što naša današnja formulacija teorije struna pretpostavlja postojanje prostora i vremena u kojima se strune (i druge sastavnice koje nalazimo u M-teoriji) gibaju i titraju. Tako možemo deducirati fizikalna svojstva teorije struna u svemiru s jednom vremenskom dimenzijom, određenim brojem protežnih prostornih dimenzija (obično se smatra da ih je tri) i s dodatnim dimenzijama koje su uvijene u neki od oblika koje jednadžbe teorije dopuštaju. Ali, to je donekle slično procjenjivanju stvaralačke nadarenosti umjetnice po tome kako ispunjava bojanku. Ona će zacijelo tu i tamo dodati kakvu osobnu značajku, ali budući da joj je format djela tako strogo ograničen, mi ćemo naslu-

titi tek malen dio njezinih sposobnosti. Slično tome, budući da se pobjeda teorije struna sastoji u tome što ona prirodno uključuje kvantnu mehaniku i gravitaciju, i budući da je gravitacija ograničena oblikom prostora i vremena, ne bismo smjeli sputavati teoriju tako što bismo je prisiljavali da djeluje unutar već postojećeg prostornovremenskog okvira. Umjesto toga, upravo kao što bismo trebali omogućiti našoj umjetnici da radi na bijelom platnu, isto tako bismo trebali omogućiti teoriji struna da *stvori* svoju vlastitu arenu prostorvremena tako što će započeti u besprostornoj i bezvremenskoj konfiguraciji.

Nadamo se da će od te prazne ploče – možda u eri prije velikog praska (ako se smijemo poslužiti vremenskim izrazima, u nedostatku drugog jezičnog okvira) – teorija opisati univerzum koji se razvija u oblik u kojem nastaje pozadina koherentnih vibracija struna, koje nam pak daju uobičajene pojmove prostora i vremena. Takav okvir, kad bi se ostvario, pokazao bi da prostor, vrijeme, a po asocijaciji i dimenzije,

nisu bitni elementi za definiciju univerzuma. Umjesto toga, oni su tek prikladni pojmovi koji izranjaju iz temeljnog, atavističkog, prvotnog stanja.

Avangardna istraživanja određenih aspekata M-teorije, koje predvode Stephen Shenker, Edward Witten, Tom Banks, Willy Fischler, Leonard Susskind i drugi, kojih je previše da bismo ih sve nabrojili, pokazala su da bi nam nešto što se naziva *nultom branom* – a što je možda najosnovnija sastavnica M-teorije, objekt koji se na velikim udaljenostima ponaša donekle poput točkaste čestice, ali na kratkim udaljenostima ima drastično drukčija svojstva – moglo pružiti uvid u besprostorno i bezvremensko područje. Njihov rad otkrio je da, dok nam strune pokazuju da uobičajeni pojmovi prostora i vremena gube relevantnost na udaljenostima kraćim od Planckove duljine, nulte brane daju u biti jednak zaključak, ali otvaraju i sićušan prozor s pogledom na nov, nekonvencionalni okvir koji preuzima njihovo mjesto. Stu-

dije s nultim branama naznačuju da običnu geometriju zamjenjuje ona koju se naziva nekomutativnom geometrijom, područjem matematike koje je velikim dijelom razvio francuski matematičar Alain Connes.[4] U tom geometrijskom okviru tope se uobičajeni pojmovi prostora i udaljenosti, i ostavljaju nas u znatno drukčijem pojmovnom krajoliku. No ipak, dok usmjeravamo pozornost na razmjere veće od Planckove duljine, fizičari su pokazali da se naš uobičajeni pojam prostora ipak iznova pojavljuje. Okvir nekomutativne geometrije vjerojatno je još nekoliko važnih koraka daleko od stanja prazne ploče koje smo gore anticipirali, ali daje nam naznaku o tome što bi mogao sadržavati potpuniji okvir, koji bi obuhvatio prostor i vrijeme.

Pronaći ispravan matematički aparat za formuliranje teorije struna bez pozivanja na postojeće pojmove prostora i vremena jedan je od najvažnijih zadataka teoretičara struna. Kad budemo razumjeli kako nastaju prostor i vrijeme načinit ćemo golem korak prema odgovoru na presudno pi-

tanje: koja se geometrijska forma *doista* pojavljuje.

Hoće li teorija struna dovesti do preformulacije kvantne mehanike?

Svemirom vladaju načela kvantne mehanike, i to s fantastičnom preciznošću. No ipak, formulirajući teorije proteklih pola stoljeća, fizičari su slijedili strategiju koja, govoreći strukturalno, postavlja kvantnu mehaniku na sekundarno mjesto. Radeći na teorijama, fizičari često počinju s u potpunosti klasičnim jezikom koji ignorira kvantne vjerojatnosti, valne funkcije i tako dalje – jezikom koji bi savršeno

---

[4] Ako poznajete linearnu algebru, jednostavan i relevantan način razmišljanja o nekomutativnoj geometriji je zamijeniti uobičajene Kartezijeve koordinate koje su komutativne za množenje, matricama, koje to nisu.

dobro razumjeli fizičari u doba Maxwella, pa čak i u Newtonovo doba – a tek tada tom klasičnom okviru dodaju kvantne pojmove. Taj pristup nas ni ne iznenađuje, jer je izravan odraz naših iskustava. Na prvi pogled, čini se da svemirom vladaju zakoni utemeljeni na klasičnim pojmovima: čestica ima precizno određen položaj i precizno određenu brzinu u svakom danom trenutku. Tek nakon detaljnih mikroskopskih istraživanja shvaćamo da te poznate klasične pojmove moramo modificirati. Naš proces otkrivanja prešao je iz klasičnog okvira u onaj koji su promijenila kvantna otkrića, a taj napredak zrcali se u načinu na koji fizičari sve do danas grade svoje teorije.

Takav je slučaj i s teorijom struna. Matematički formalizam koji opisuje teoriju struna počinje jednadžbama koje opisuju gibanje sićušne, beskonačno tanke, *klasične* niti – jednadžbama koje bi u velikoj mjeri mogao napisati i Newton prije nekih tri stotine godina. Te se jednadžbe potom *kvantiziraju*. Naime, na sustavan način koji su fizičari

razvijali više od pedeset godina, klasične jednadžbe se pretvaraju u kvantnomehanički oblik, koji uključuje vjerojatnosti, neodređenost, kvantne fluktuacije i tako dalje. Zapravo, u poglavlju 12 vidjeli smo taj postupak na djelu: procesi s petljama (vidi sliku 12.6) sadrže kvantne pojmove – u ovom slučaju, trenutno kvantnomehaničko stvaranje parova virtualnih struna – pri čemu broj petlji određuje preciznost kojom se objašnjava kvantnomehaničke učinke.

Strategija polaženja od klasičnog teorijskog opisa i naknadnog dodavanja svojstava kvantne mehanike godinama je bila vrlo plodna. Na primjer, ona je potkrepljivala standardni model fizike čestica. No moguće je, a sve je više dokaza da je i vjerojatno, da je taj model odviše konzervativan za teorije koje su tako dalekosežne kao što su to teorija struna i M-teorija. Jer, kad shvatimo da svemirom vladaju kvantnomehanička načela, naše teorije zapravo bi trebale od samoga početka biti kvantnomehaničke. Dosad smo s uspjehom po-

činjali iz klasične perspektive jer nismo sondirali svemir na dovoljno dubokoj razini da bi nas naš grubi pristup mogao zavesti na krivi trag. Ali s obzirom na dubinu teorije struna / M-teorije, vjerojatno smo iscrpili tu prokušanu strategiju.

Konkretne dokaze toga vidjet ćemo razmotrimo li neke spoznaje iz druge revolucije superstruna (prikazane, na primjer, na slici 12.11). Kao što smo raspravili u poglavlju 12, dvojnosti koje su u osnovi jedinstva pet teorija struna pokazuju nam da se fizikalna svojstva koja se pojavljuju u jednoj formulaciji teorije struna mogu protumačiti dvojnim jezikom svake druge formulacije. Na prvi pogled činit će se da ta preformulacija nema nikakve veze s prvotnim opisom, ali to je zapravo samo snaga dvojnosti na djelu: dvojnost znači da se jedan fizikalni proces može opisati na nekoliko različitih načina. Ti rezultati u isti mah su i istančani i revolucionarni, ali još nismo spomenuli njihovo možda i najvažnije obilježje.

Ti dvojni prijevodi često počinju s procesom, opisanim u jednoj od pet teorija struna, koji u *velikoj* mjeri ovisi o

kvantnoj mehanici (na primjer, proces koji sadrži interakcije struna koje se ne bi dogodile kad bi svijetom vladala klasična, a ne kvantna fizika) i potom ga preformuliraju kao proces koji u *manjoj* mjeri ovisi o kvantnoj mehanici iz perspektive neke druge teorije struna (na primjer, proces čija su detaljna numerička svojstva pod utjecajem kvantnih obilježja ali čija je kvalitativna forma slična onoj kakva bi bila u posve klasičnom svijetu). To znači da je kvantna mehanika u cjelini prepletena dvojnim simetrijama koje su u osnovi teorije struna / M-teorije: to su *inherentno kvantnomehaničke simetrije*, jer je jedan od dvojnih opisa pod jakim utjecajem kvantnih obilježja. To je jaka naznaka da potpuna formulacija teorije struna / M-teorije – formulacija koja u bitnome uključuje novopronađene dvojne simetrije – ne može početi klasično i tek se potom podvrgnuti kvantizaciji po tradicionalnom kalupu. Klasično polazište nužno će izostaviti dvojne simetrije jer one vrijede tek kad se u obzir

uzme kvantna mehanika. No čini se da potpuna formulacija teorija struna / M-teorije mora razbiti tradicionalni kalup i uspostaviti se kao u cjelini kvantnomehanička teorija.

Zasad nitko ne zna kako to treba učiniti. No, mnogi teoretičari struna predviđaju preformulaciju načina na koji su kvantna načela ugrađena u naš teorijski opis svemira kao sljedeći veliki preokret u našem razumijevanju. Na primjer, kako je rekao Cumrun Vafa: "Mislim da preformulacija kvantne mehanike koja će razriješiti mnoge njezine probleme čeka odmah iza ugla. Mislim da mnogi dijele mišljenje da nedavno otkrivene dvojnosti upućuju na novi, u većoj mjeri geometrijski okvir za kvantnu mehaniku, u kojem će se nerazdruživo spojiti prostor, vrijeme i kvantna svojstva."[5] A prema Edwardu Wittenu: "Vjerujem da će se logički status kvantne mehanike promijeniti slično kao što se promijenio logički status gravitacije kad je Einstein otkrio načelo ekvivalencije. Daleko od toga da je kvantna mehanika dovršila taj proces, ali mislim da će se ljudi jednoga dana osvrtati

na našu epohu kao na doba u kojemu je on počeo."[6]

Uz oprezni optimizam, mogli bismo zamisliti da će preformulacija načela kvantne mehanike u okviru teorije struna pružiti plodniji formalizam koji će nam ponuditi odgovor na pitanje kako je svemir nastao i zašto postoje prostor i vrijeme – formalizam koji će nas dovesti korak bliže odgovoru na Leibnizovo pitanje zašto postoji nešto, a ne ništa.

Može li se teorija struna provjeriti eksperimentima?

Među mnogim svojstvima teorije struna koja smo raspravili u prethodnim poglavljima, vjerojatno je najvažnije imati na umu sljedeća tri. Prvo, gravitacija i kvantna mehanika integralan su dio načina na koji svemir funkcionira i stoga svaka

---

5 Intervju s Cumrunom Vafom, 12. siječnja 1998.

6 Intervju s Edwardom Wittenom, 11. svibnja 1998.

ujedinjena teorija mora uključiti obje. Teorija struna uspjela je u tome. Drugo, proučavanja fizičara u proteklom stoljeću otkrila su da postoje i druge važne ideje – od kojih su mnoge potvrđene u eksperimentima – koje zauzimaju važno mjesto u našem razumijevanju univerzuma. Među njima su pojmovi spina, porodične strukture čestica materije, glasničke čestice, baždarna simetrija, načelo ekvivalencije, kršenje simetrije i supersimetrija – da navedemo samo neke. Svi ti pojmovi prirodno izrastaju iz teorije struna. Treće, za razliku od uobičajenih teorija, kao što je standardni model, koji ima 19 slobodnih parametara koje treba prilagođavati kako bi se osiguralo poklapanje s mjerenjima dobivenim u eksperimentima, teorija struna nema prilagodljivih parametara. U načelu, njezine implikacije trebale bi biti konačne – trebale bi ponuditi nedvosmislen test koji razrješava pitanje je li teorija istinita ili pogrešna.

Put od te "načelne" logike do "praktičnih" činjenica posut je mnogim preprekama. U poglavlju 9 opisali smo neke

tehničke teškoće, kao što je određivanje oblika dodatnih dimenzija, koje nam trenutačno stoje na putu. U poglavljima 12 i 13 smjestili smo te i druge prepreke u širi kontekst potrebe za egzaktnim razumijevanjem teorije struna, koje nas, kao što smo vidjeli, prirodno vodi do razmatranja M-teorije. Nema dvojbe da će za dosezanje punog razumijevanja teorije struna / M-teorije biti potrebno još mnogo truda i ne manje domišljatosti.

Teoretičari struna na svakom koraku tog puta traže posljedice teorije koje se može opažati u eksperimentima. Ne smijemo izgubiti iz vida malo vjerojatne mogućnosti za nalaženje dokaza teorije struna koje smo izložili u poglavlju 9. Nadalje, kako se naše razumijevanje bude produbljivalo, zasigurno će se otkriti i drugi rijetki procesi ili svojstva teorije struna koja će odati i druge, neizravne eksperimentalne potpise.

No, što je najvažnije, potvrda supersimetrije otkrićem superpartnerskih čestica koje smo izložili u poglavlju 9 bila

bi presudan čin za teoriju struna. Prisjetimo se da je supersimetrija otkrivena tijekom teorijskih istraživanja teorije struna i da je ona središnji dio teorije. Njezina potvrda u eksperimentima bila bi uvjerljiva naznaka postojanja struna. Štoviše, pronalazak superpartnerskih čestica bio bi dobrodošao izazov, jer otkriće supersimetrije ne bi samo dalo odgovor je li teorija struna relevantna za naš svijet nego bi značilo i mnogo više. Mase i naboji superpartnerskih čestica otkrili bi kako je točno supersimetrija ugrađena u zakone prirode. Teoretičari struna tada bi se suočili s izazovom da otkriju može li se ta implementacija u potpunosti ostvariti ili objasniti teorijom struna. Naravno, možemo gajiti optimizam i nadati se da će u sljedećem desetljeću – prije nego što proradi veliki hadronski sudarač u Ženevi – razumijevanje teorije struna dovoljno napredovati da ona donese detaljna predviđanja o superpartnerskim česticama prije nego što dođe do njihova planiranog otkrića. Potvrda takvih predviđanja bila bi veličanstven trenutak u povijesti znanosti.

Postoje li granice objašnjavanja?

Objasniti sve, čak i ograničenom smislu razumijevanja svih aspekata sila i elementarnih sastavnica svemira, jedan je od najvećih izazova s kojima se znanost ikada suočila. Prvi put u povijesti, teorija superstruna pruža nam okvir koji, kako se čini, seže dovoljno duboko da može ponuditi odgovore. No hoćemo li ikada u potpunosti ispuniti obećanje teorije i, na primjer, izračunati mase kvarkova ili iznose elektromagnetske sile, brojeve čije precizne vrijednosti određuju toliko mnogo toga u svemiru? Kao i u prethodnim odjeljcima, na putu prema tim ciljevima morat ćemo svladati brojne teorijske prepreke – a najistaknutija od njih danas je – kako postići cjelovitu neperturbacijsku formulaciju teorije struna / M-teorije.

No, je li moguće da, čak i kad bismo stekli egzaktno razumijevanje teorije struna / M-teorije, u okviru nove, transparentne formulacije kvantne mehanike, ipak ne bismo uspjeli izračunati mase čestica i naboje sila? Je li moguće da bismo ipak morali pribjeći mjerenjima u eksperimentima kako bismo dobili te vrijednosti? Štoviše, možda taj neuspjeh neće značiti da nam treba još dublja teorija nego će to jednostavno odražavati činjenicu da objašnjenje za opažena svojstva stvarnosti uopće ne postoji?

Prvo nam pada na pamet pozitivan odgovor na to pitanje. Kao što je Einstein još davno napisao: "Ono neshvatljivo u vezi sa svemirom jest to što je shvatljiv."[7] Divljenje našoj sposobnosti da uopće razumijemo svijet lako se gubi u vremenu brzog i impresivnog napretka. No, razumljivost možda ima i granicu. Možda moramo prihvatiti da će neki aspekti svemira ostati neobjašnjeni i nakon što dosegnemo najdublju moguću razinu razumijevanja koju znanost može dosegnuti. Možda ćemo morati prihvatiti da su neka

obilježja univerzuma takva kakva jesu pukim slučajem, ili božanskim odabirom. Uspjeh znanstvene metode u prošlosti potaknuo nas je da mislimo kako ćemo uz dovoljno uloženog vremena i truda *uspjeti* razotkriti tajne prirode. No, kad bismo dosegnuli apsolutnu granicu znanstvenog objašnjenja – ne neku tehnološku prepreku, niti tek granicu današnjeg razumijevanja – to bi bio jedinstven događaj, za koji nas nijedno iskustvo iz prošlosti nije moglo pripremiti.

Premda je to pitanje od velike važnosti za našu potragu za konačnom teorijom, danas ga još ne možemo riješiti, štoviše, mogućnost da postoje granice znanstvenog objašnjenja, u širokom smislu koji smo ovdje izložili, pitanje je koje možda nikad nećemo riješiti. Na primjer, vidjeli smo da se čak i spekulativni pojam multiverzuma, koji na prvi pogled predstavlja konačnu granicu znanstvenog objašnjenja, može

---

7 Citirano u: Banesh Hoffman i Helen Dukas, *Albert Einstein, Creator and Rebel* (New York: Viking, 1972), str. 18.

doraditi osmišljavanjem jednako spekulativnih teorija koje također imaju moć predviđanja, barem u načelu.

U tim razmatranjima jasno se ocrtava uloga kozmologije u određivanju implikacija konačne teorije. Kao što smo rekli, kozmologija superstruna mlado je područje, čak i prema mjerilima same te teorije. Ono će u nadolazećim godinama zacijelo biti poprište fundamentalnih istraživanja i vjerojatno će se razvijati vrlo brzo. Kako budemo stjecali nove spoznaje o svojstvima teorije struna / M-teorije, naša sposobnost da procijenimo kozmološke implikacije tog pokušaja ostvarenja ujedinjene teorije postajat će sve veća. Naravno, moguće je da će nas ta proučavanja jednoga dana uvjeriti da granica znanstvene spoznaje uistinu postoji. Ali moguće je i da će ona značiti početak novog doba – doba u kojemu ćemo moći objaviti da je fundamentalno objašnjenje univerzuma napokon pronađeno.

Premda smo tehnološki prikovani za Zemlju i njezine prve susjede u Sunčevu sustavu, snagom mišljenja i provođenja eksperimenata sondirali smo daleke predjele mikrokozmosa i makrokozmosa. Posebno proteklih stotinu godina, zajednički trud brojnih fizičara otkrio je neke od najbolje čuvanih tajni prirode. Ti spoznajni dragulji otvorili su vidike na svijet koji smo mislili da znamo, ali njegov sjaj nismo mogli ni zamisliti. Dubina fizikalne teorije može se mjeriti i time u kojem stupnju postavlja ozbiljne izazove onim aspektima našega svjetonazora koji su se doimali nepromjenjivima. Prema tom mjerilu, kvantna mehanika i teorije relativnosti nadmašile su i najluđa očekivanja: valne funkcije, vjerojatnosti, kvantno tuneliranje, neprestane, grozničave kvantne fluktuacije vakuuma, rastakanje prostora i vremena, relativna priroda istodobnosti, zakrivljenost tkiva pro-

storvremena, crne rupe, veliki prasak. Tko bi i pomislio da će se intuitivno jasna, mehanička njutnovska perspektiva danas doimati tako provincijalnom – da tik ispod površine stvari kakve obično doživljavamo postoji cijeli novi, zapanjujući svijet?

No čak i ta otkrića koja mijenjaju paradigme samo su dio šire, sveobuhvatne priče. Uz čvrstu vjeru da bi se zakoni velikoga i zakoni maloga trebali uklopiti u koherentnu cjelinu, fizičari neumorno love ujedinjenu teoriju. Potraga nije gotova, ali u okviru teorije superstruna i njezina razvoja u M-teoriju napokon se pojavio uvjerljiv okvir za spajanje kvantne mehanike, opće teorije relativnosti i jake, slabe i elektromagnetske sile. Taj proces dovodi u pitanje naša stara viđenja svijeta: petlje struna i oscilirajućih kapljica ujedinjuju sve što je stvoreno u vibracijske modele koji se precizno izvode u univerzumu s mnoštvom skrivenih dimenzija, sposobnih za krajnja iskrivljenja u kojima se njihovo prostorno tkanje cijepa, a potom samo sebe obnavlja. Tko bi pomislio da će

spajanje gravitacije i kvantne mehanike u ujedinjenu teoriju cjelokupne materije i svih sila prouzročiti takav preokret u našem razumijevanju mehanizma svemira?

Nema dvojbe da nas čekaju i veća iznenađenja u potrazi za potpunim, i u potpunosti izračunljivim razumijevanjem teorije superstruna. Proučavanja M-teorije već su nam ponudila naznake o novom, začudnom području univerzuma koje vreba ispod Planckove duljine, području u kojem vjerojatno ne postoje pojmovi prostora ni vremena. Kao suprotnu krajnost, vidjeli smo i da je naš univerzum možda samo jedan od nebrojenih mjehurića na površini golemog, burnog kozmičkog oceana koji nazivamo multiverzumom. Te ideje su u velikoj mjeri spekulativne, ali one su možda predznak našeg sljedećeg skoka u razumijevanju univerzuma.

Dok zagledani u budućnost iščekujemo sva čuda svijeta, trebali bismo se i osvrnuti i diviti se putu koji smo već prevalili. Potraga za fundamentalnim zakonima univerzu-

ma istinska je ljudska drama, koja proširuje granice uma i obogaćuje duh. Einsteinov živopisan prikaz svoje potrage za spoznajom gravitacije – "godine tjeskobnoga traženja u mraku, s jakom čežnjom, izmjenama samopouzdanja i iscrpljenosti, i konačnim izlaskom na svjetlo dana"[8] – obuhvaća sva uistinu ljudska stremljenja. Svi mi, svatko na svoj način, tragači smo za istinom i žudimo za odgovorom na pitanje zašto smo ovdje. Dok se zajednički penjemo planinom spoznaje, svaki naraštaj čvrsto stoji na ramenima prethodnih i hrabro seže prema vrhu. Hoće li naši potomci ikada uživati u vidiku koji se pruža s vrha i savršeno jasnim pogledom obuhvatiti sav golem, elegantni svemir – to ne možemo predvidjeti. No budući da se svaki naraštaj penje sve više, shvaćamo izjavu Jacoba Bronowskog da "svako doba ima prekretnicu, nov način viđenja i uspostavljanja koherencije svijeta".[9] Dok se naš naraštaj divi tom novom pogledu na univerzum – našoj novoj uspostavi koherencije svijeta – mi obavljamo svoj dio posla: izrađujemo svoju prečku u ljestva-

ma kojima se čovječanstvo uspinje prema zvijezdama.

---

8 Martin J. Klein, "Einstein: The Life and Times, by R. W. Clark" (prikaz knjige), *Science* 174, str. 1315-16.

9 Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), str. 20.

Glosar znanstvenih pojmova

Apsolutna nula. Najniža moguća temperatura, oko -273 stupnjeva Celzija ili 0 na Kelvinovoj skali.

Akceleracija (ubrzanje). Promjena brzine ili smjera objekta. Vidi i *brzina.*

Akcelerator. Vidi *ubrzivač čestica.*

Amplituda. Maksimalna visina vrha vala ili maksimalna dubina dola vala.

Antropsko načelo. Doktrina da jedno od objašnjenja zašto uni-

verzum ima svojstva koja opažamo glasi da život vjerojatno ne bi nastao kad bi ona bila drukčija i stoga ne bi bilo nas da opažamo što je drukčije

Antimaterija. Materija koja ima ista gravitacijska svojstva kao obična materija, ali suprotan električni naboj i suprotne *naboje nuklearnih sila*

Antičestica. Čestica *antimaterije*.

N.P. Kratica za "nakon praska"; obično služi da naznači vrijeme proteklo nakon *velikog praska*.

Atom. Osnovni gradivni blok materije; sastoji se od *jezgre* (obuhvaća *protone* i *neutrone*) i roja *elektrona* oko nje.

Veliki prasak. Trenutačno prihvaćena teorija da je univerzum u širenju koje je počelo prije oko 15 milijardi godina, stanjem goleme energije, gustoće i sabijenosti.

Veliko sažimanje. Hipotetična budućnost univerzuma u kojoj današnje širenje prestaje, preobrće smjer i rezultira urušavanjem sveg prostora i sve materije; obrat od *velikog praska*.

Crna rupa. Objekt čije golemo gravitacijsko polje zahvaća sve, pa čak i svjetlost, što mu se previše približi (bliže od *horizonta događaja* crne rupe).

Entropija crne rupe. *Entropija* ugrađena u *crnu rupu*.

Bozon. Čestica, ili obrazac titranja *struna*, s cjelobrojnom količinom *spina*; tipično, *glasnička čestica*.

Bozonska teorija struna. Prva poznata teorija struna; sadrži *titrajne obrasce* koji su svi *bozoni*.

BPS-stanja. Konfiguracije u *supersimetričnoj* teoriji čija svojstva se mogu egzaktno odrediti argumentima na temelju *simetrije*.

Brana. Svaki protežni objekt koji se javlja u *teoriji struna*. Jednobrana je *struna*, dvobrana je membrana, trobrana ima tri protežne dimenzije itd. Općenito, p-brana ima p prostornih dimenzija.

Calabi-Yauov prostor, Calabi-Yauov oblik. Prostor (oblik) u koji se mogu uviti dodatne prostorne dimenzije koje zahtijeva *teorija struna*; podvrgava se jednadžbama teorije.

Naboj. Vidi naboj sile.

Kiralno, kiralnost. Svojstvo fundamentalne fizike čestica koje razlikuje lijevu stranu od desne, i pokazuje da univerzum nije u potpunosti lijevo-desno simetričan.

Zatvorena struna. Vrsta *strune* koja je u obliku petlje.

Konifoldni prijelaz. Promjena Calabi-Yauovog dijela prostora u kojemu se njegovo tkivo cijepa i obnavlja se, ali s blagim, prihvatljivim fizikalnim posljedicama u kontekstu *teorije struna*. Cijepanje je jače od onoga u *inverznom prijelazu*.

Kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje. Mikrovalno zračenje koje prožima univerzum, nastalo u *velikom prasku*, nakon čega slabi i hladi se kako se univerzum širi.

Kozmološka konstanta. Modifikacija prvotnih jednadžbi *opće teorije relativnosti* koja omogućuje statičan univerzum; može se interpretirati kao konstantna gustoća energije u vakuumu.

Konstanta vezanja. Vidi *konstanta vezanja struna*.

Uvijena dimenzija. Prostorna dimenzija koja nema opazivo ve-

liku protežnost; prostorna dimenzija koja je skutrena, zakovrčana ili zavijena u sićušne razmjere te se stoga ne može izravno detektirati.

Zakrivljenost. Odstupanje objekta, prostora ili *prostorvremena* od *ravnoga* oblika i stoga od pravila geometrije koja je kodificirao Euklid.

Dimenzija. Neovisna os ili smjer u prostoru ili *prostorvremenu*. Poznati prostor oko nas ima tri dimenzije (lijevo-desno, naprijed-natrag i gore-dolje), a poznato nam *prostorvrijeme* ima ih četiri (navedene tri osi i četvrtu os, prošlost-budućnost). *Teorija superstruna* zahtijeva da univerzum ima dodatne prostorne dimenzije.

Dvojno, dvojnost, simetrije dvojnosti. Situacija u kojoj se čini da su dvije ili više teorija posve različite, ali zapravo daju identične fizikalne posljedice.

Elektromagnetsko polje. Polje sila *elektromagnetske sile*; sastoji se od električnih i magnetskih silnica u svakoj točki u prostoru.

Elektromagnetska sila. Jedna od četiri fundamentalne sile, spoj električne i magnetske sile.

Elektromagnetska baždarna simetrija. *Baždarna simetrija* u osnovi *kvantne elektrodinamike*.

Elektromagnetsko zračenje. Energija koju nosi elektromagnetski val.

Elektromagnetski val. Valni poremećaj u *elektromagnetskom polju*; svi takvi valovi putuju brzinom svjetlosti. Primjeri su: vidljiva svjetlost, rendgenske zrake, mikrovalovi i infracrveno zračenje.

Elektron. Negativno nabijena čestica; obično orbitira oko jezgre *atoma*.

Elektroslaba teorija. Relativistička kvantna teorija polja koja opisuje *slabu silu* i *elektromagnetsku silu* u jednom, ujedinjenom okviru.

Jedanaestodimenzionalna supergravitacija. Obećavajuća višedimenzionalna teorija *supergravitacije*, razvijena 1970-ih, potom ignorirana, a u novije vrijeme važan je dio *teorije struna*.

Entropija. Mjera nereda u fizikalnom sustavu; broj rasporeda sastojaka sustava koji ne mijenjaju njegov opći izgled.

Horizont događaja. Jednosmjerna površina *crne rupe*; kad se prođe kroz nju, zakoni gravitacije osiguravaju da nema povratka, nema bijega iz gravitacijskog stiska crne rupe.

Protežna dimenzija. Prostorna (i prostorvremenska) *dimenzija* koja je velika i izravno vidljiva; dimenzija koja nam je dobro poznata, za razliku od *uvijene dimenzije*.

Ekstremne crne rupe. *Crne rupe* ispunjene maksimalnom količinom *naboja sila* koja je moguća za danu ukupnu masu.

Porodice. Organizacija materijalnih čestica u tri skupine, pri čemu se svaku naziva porodicom. Čestice u svakoj sljedećoj obitelji razlikuju se od onih u prethodnoj po tome što su teže, ali nose jednake električne i nuklearne *naboje sila*.

Fermion. Čestica, ili obrazac titranja struna, s polucjelobrojnim *spinom*; obično, materijalna čestica.

Feynmanov zbroj svih putanja. Vidi *zbroj svih putanja*.

Polje, polje sile. Iz *makroskopske* perspektive, sredstvo kojim sila

Polje; polje sile. Iz *makroskopske* perspektive, sredstvo kojim sila izražava svoj utjecaj; opisuje se nizom brojeva u svakoj točki prostora koji izražavaju iznos i smjer sile u toj točki.

Ravno. Ono što se podvrgava pravilima geometrije kako ih je kodificirao Euklid; oblik, poput površine savršeno glatkog stola, i njegove višedimenzionalne generalizacije.

Inverzni prijelaz. Promjena *Calabi-Yauovog* dijela prostora u kojem se njegovo tkivo cijepa i obnavlja se, ali s blagim i prihvatljivim fizikalnim posljedicama u kontekstu teorije struna.

Pjena. Vidi prostornovremenska pjena.

Naboj sile. Svojstvo čestice koje određuje kako ona reagira na pojedinu silu. Na primjer, električni naboj čestice određuje kako ona reagira na *elektromagnetsku silu*.

Frekvencija. Broj potpunih valnih ciklusa kroz koje val prođe u sekundi.

Baždarna simetrija. Načelo *simetrije* u osnovi kvantnomehaničkog opisa triju negravitacijskih sila; ta simetrija uključuje

invarijantnost fizikalnog sustava podvrgnutog raznim promjenama vrijednosti *naboja sila*, promjenama koje se i same mijenjaju od mjesta do mjesta i iz trenutka u trenutak.

Opća teorija relativnosti. Einsteinova formulacija gravitacije koja pokazuje da prostor i vrijeme izražavaju gravitacijsku silu svojom *zakrivljenošću*.

Gluon. Najmanja grudica *polja jake sile*; *glasnička čestica* jake sile.

Veliko ujedinjenje. Klasa teorija koje ujedinjuju sve tri negravitacijske sile u jedinstven teorijski okvir.

Gravitacijska sila. Najslabija od četiriju fundamentalnih prirodnih sila. Opisala ju je Newtonova opća teorija gravitacije, a poslije i Einsteinova *opća teorija relativnosti*.

Graviton. Najmanja grudica *gravitacijskog polja sile*; *glasnička čestica* gravitacijske sile.

Heterotička-E teorija struna (Heterotička E_8xE_8 teorija struna). Jedna od pet *teorija superstruna*; uključuje zatvorene strune čije vibracije udesno nalikuju onima u *teoriji struna tipa II*, a vibracije ulijevo uključuju one iz *bozonske teorije*. U

važnim ali istančanim pojedinostima razlikuje se od *heterotičke-O teorije struna*.

Heterotička-O teorija struna (Heterotička O(32) teorija struna). Jedna od pet *teorija superstruna*; uključuje zatvorene strune čije vibracije udesno nalikuju onima u *teoriji struna tipa II*, a vibracije ulijevo uključuju one iz *bozonske teorije*. U važnim ali istančanim pojedinostima razlikuje se od *heterotičke-E teorije struna*.

Višedimenzionalna supergravitacija. Klasa teorija supergravitacije u više od četiri *prostornovremenske* dimenzije.

Problem horizonta. Kozmološka zagonetka povezana s činjenicom da područja svemira koja razdvajaju velike udaljenosti imaju gotovo identična svojstva, na primjer temperaturu. Jedno rješenje nudi *inflacijska kozmologija*.

Beskonačnosti. Tipično besmisleno rješenje koje se dobiva izračunima koji uključuju *opću teoriju relativnosti* i *kvantnu mehaniku* u okviru točkastih čestica.

Inflacija, inflacijska kozmologija. Modifikacija prvih trenutaka

standardne kozmologije velikog praska u kojoj svemir prolazi kroz kratku fazu krajnje brzog širenja.

Početni uvjeti. Podaci koji opisuju početno stanje kakva fizikalnog sustava.

Interferencijski uzorak. Valni uzorak koji se pojavljuje preklapanjem i miješanjem valova emitiranih s različitih lokacija.

Kaluza-Kleinova teorija. Klasa teorija koje uključuju dodatne *uvijene dimenzije*, zajedno s kvantnom mehanikom.

Kelvin. Temperaturna ljestvica u kojoj se temperatura izražava u odnosu na *apsolutnu nulu*.

Klein-Gordonova jednadžba. Osnovna jednadžba *relativističke kvantne teorije polja*.

Laplaceovski determinizam. Mehaničko shvaćanje univerzuma prema kojemu potpuno znanje o stanju univerzuma u jednom trenutku u potpunosti određuje njegovo stanje u svim trenucima u budućnosti i prošlosti.

Svjetlosni sat. Hipotetični sat koji mjeri vrijeme proteklo brojeći koliko je puta jedan foton prevalio udaljenost između dvaju

koliko je puta jedan foton prevalio udaljenost između dvaju zrcala.

Lorentzova kontrakcija. Svojstvo koje izvire iz specijalne teorije relativnosti, prema kojemu se pokretni objekt skraćuje uzduž smjera gibanja.

Makroskopsko. Odnosi se na razmjere na koje obično nailazimo u svakodnevnom svijetu; suprotno mikroskopskom.

Crna rupa bez mase. U teoriji struna, osobita vrsta crne rupe koja je možda na početku imala veliku masu, ali postaje sve lakša kako se smanjuje dio Calabi-Yauova prostora. Kad se taj dio prostora smanji u točku, na početku masivna crna rupa više nema nikakvu masu. U tom stanju ona više ne izražava uobičajena svojstva crne rupe, kao što je horizont događaja.

Maxwellova teorija, Maxwellova elektromagnetska teorija. Teorija koja ujedinjuje elektricitet i magnetizam, na temelju pojma elektromagnetskog polja koji je Maxwell osmislio 1880-ih; pokazuje da je vidljiva svjetlost primjer elektromagnetskog vala.

Glasnička čestica. Najmanja grudica *polja sile*; mikroskopski prenositelj sile.++

Zrcalna simetrija. U kontekstu teorije struna, simetrija koja pokazuje da dva različita *Calabi-Yauova oblika*, poznata kao zrcalni par, daju identična fizikalna svojstva kad ih se odabere s obzirom na *uvijenu dimenziju teorije struna*.

M-teorija. Teorija nastala u *drugoj revoluciji superstruna* koja ujedinjuje prethodnih pet *teorija superstruna* unutar jedinstvenog, sveobuhvatnog okvira. Čini se da M-teorija uključuje jedanaest *prostornovremenskih dimenzija*, iako tek treba otkriti mnoge njezine pojedinosti.

Višedimenzionalna rupa. Generalizacija rupe kakvu vidimo u torusu na višedimenzionalne verzije.

Multitorus. Generalizacija oblika uštipka ili torusa koja ima više rupa.

Multiverzum. Hipotetično uvećanje svemira u kojemu je naš univerzum samo jedan od golemog broja posebnih i odvojenih univerzuma.

Neutrino. Električki neutralna čestica, podložna samo *slaboj sili*.

Neutron. Električki neutralna čestica, obično se nalazi u jezgri *atoma*, a sastoji se od tri *kvarka* (dva donja i jednog gornjeg kvarka).

Newtonovi zakoni gibanja. Zakoni koji opisuju gibanje tijela na temelju shvaćanja o apsolutnom i nepromjenjivom prostoru i vremenu; ti zakoni održali su se do Einsteinovog otkrića *specijalne teorije relativnosti*.

Newtonova teorija opće gravitacije. Teorija gravitacije koja tvrdi da je privlačna sila između dvaju tijela proporcionalna umnošku njihovih masa i obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti među njima. Opovrgnuta Einsteinovim otkrićem *specijalne relativnosti*.

Neperturbacijsko. Svojstvo teorije čija valjanost ne ovisi o aproksimacijskim, *perturbacijskim* izračunima; svojstvo egzaktnosti teorije.

Jezgra. Jezgra atoma; sastoji se od *protona* i *neutrona*.

Promatrač. Idealizirana osoba ili uređaj, često hipotetičan, koji mjeri relevantna svojstva fizikalnog sustava.

Proces jedne petlje. Dio izračuna u *perturbacijskoj teoriji* u kojemu je uključen jedan virtualni par struna (ili čestica, u teoriji točkastih čestica).

Otvorena struna. Vrsta *strune* s dva slobodna kraja.

Titrajni obrazac ili model. Vidi *vibracijski obrazac ili model.*

Ubrzivač čestica. Stroj za ubrzavanje čestica gotovo do brzine svjetlosti i njihovo međusobno sudaranje kako bi se proučavala struktura materije.

Račun smetnje. Okvir za pojednostavljivanje teškoga problema pronalaženjem aproksimacijskog rješenja koje se potom dorađuje sistematskim uključivanjem dodatnih pojedinosti koje se na početku zanemarivalo.

Perturbacijski pristup, perturbacijska metoda. Vidi *račun smetnji.*

Faza. Kad se primjenjuje u kontekstu materije, opisuje njezina moguća agregatna stanja: čvrsto, tekuće, plinovito. Općenitije, odnosi se na moguće opise fizikalnog sustava dok se mi-

je, odnosi se na moguće opise fizikalnog sustava dok se mijenjaju svojstva o kojima on ovisi (temperatura, vrijednosti *konstante vezanja struna*, oblik prostorvremena itd.).

Fazni prijelaz. Prijelaz fizikalnog sustava iz jedne *faze* u drugu.

Fotoelektrični efekt. Pojava u kojoj se *elektroni* izbacuju iz metalne površine kad je obasja svjetlost.

Foton. Najmanja grudica elektromagnetskog polja sile; glasnička čestica elektromagnetske sile, najmanji paketić svjetlosti.

Planckova energija. Oko 1000 kilovatsati. Energija potrebna za sondiranje udaljenosti jednakih *Planckovoj duljini*. Tipična energija titrajuće *strune* u *teoriji struna*.

Planckova duljina. Oko 10^{-33} centimetara. Na skali manjoj od te, *kvantne fluktuacije* u tkivu *prostorvremena* postale bi goleme. Veličina tipične strune u teoriji struna.

Planckova masa. Oko deset milijardi milijardi puta veća je od mase *protona*; oko stotisućinke grama; približno, masa zrnca prašine. Tipična masa titrajuće *strune* u *teoriji struna*.

Planckova konstanta. Označava je simbol $\hbar$; Planckova konstan-

ta je fundamentalni parametar u *kvantnoj mehanici*. Određuje veličinu diskretnih jedinica energije, mase, spina itd. na koje je mikroskopski svijet podijeljen. Vrijednost joj je 1,05 x 10^{-27} g cm/s.

Planckova napetost. Oko 10^{39} tona. Napetost tipične *strune* u *teoriji struna*.

Planckovo vrijeme. Oko 10^{-43} sekundi. Vrijeme kad je svemir bio otprilike *Planckove duljine*; preciznije, vrijeme potrebno da svjetlost prevali *Planckovu duljinu*.

Primordijalna nukleosinteza. Proizvodnja atomskih jezgara tijekom prve tri minute nakon *velikog praska*.

Načelo ekvivalencije. Glavno načelo *opće teorije relativnosti* koje objavljuje nerazlikovnost ubrzanoga gibanja i uronjenosti u gravitacijsko polje (na dovoljno malenom području promatranja). Poopćuje *načelo relativnosti* pokazujući da svi promatrači, bez obzira na njihovo stanje gibanja, mogu tvrditi da miruju, sve dok priznaju prisutnost odgovarajućeg gravitacijskog polja.

Načelo relativnosti. Glavno načelo *specijalne teorije relativnosti* koje objavljuje da su svi promatrači koji se jednoliko gibaju podvrgnuti identičnom skupu fizikalnih zakona te da stoga svaki promatrač koji se jednoliko giba opravdano tvrdi da miruje. To načelo se poopćuje *načelom ekvivalencije*.

Umnožak. Rezultat množenja dvaju brojeva.

Proton. Pozitivno nabijena čestica; obično se nalazi u jezgri *atoma*, a sastoji se od tri *kvarka* (dva gornja i jednog donjeg kvarka).

Kvanti. Najmanje fizikalne jedinice na koje se nešto može podijeliti, u skladu sa zakonima kvantne mehanike. Na primjer, fotoni su kvanti elektromagnetskog polja.

Kvantna kromodinamika (QCD, quantum chromodynamics). Relativistička kvantna teorija polja jake sile i kvarkova; uključuje specijalnu teoriju relativnosti.

Kvantna klaustrofobija. Vidi *kvantne fluktuacije*.

Kvantni determinizam. Svojstvo kvantne mehanike da znanje o kvantnom stanju sustava u jednom trenutku u potpunosti

određuje njegovo kvantno stanje u budućim i prošlim trenucima. Međutim, znanje o kvantnom stanju određuje samo vjerojatnost da će se jedno ili drugo stanje uistinu dogoditi.

Kvantna elektrodinamika (QED, quantum electrodynamics). Relativistička kvantna teorija polja elektromagnetske sile i elektrona; uključuje specijalnu teoriju relativnosti.

Kvantna elektroslaba teorija. Vidi *elektroslaba teorija*.

Kvantna teorija polja. Vidi relativistička kvantna teorija polja.

Kvantne fluktuacije. Turbulentno ponašanje sustava na mikroskopskoj razini, zbog *načela neodređenosti*.

Kvantna pjena. Vidi prostornovremenska pjena.

Kvantna geometrija. Modifikacija *Riemannove geometrije*, potrebna za točan opis fizike prostora na *ultramikroskopskoj* razini, gdje kvantni efekti postaju važni.

Kvantna gravitacija. Teorija koja uspješno stapa *kvantnu mehaniku* i *opću teoriju relativnosti*, možda uključujući modifikacije jedne od njih ili obiju. *Teorija struna* primjer je teorije kvantne gravitacije.

Kvantna mehanika. Okvir zakona koji vladaju univerzumom čija neobična svojstva, poput *neodređenosti*, *kvantnih fluktuacija* i *dvojnosti val-čestica* postaju najočitija na mikroskopskim veličinama atoma i subnuklearnih čestica.

Kvantno tuneliranje. Svojstvo *kvantne mehanike* koje pokazuje da objekti mogu prolaziti kroz prepreke koje bi trebale biti neprobojne prema Newtonovim klasičnim zakonima fizike.

Kvark. Čestica na koju djeluje *jaka sila*. Kvarkovi postoje u šest varijacija (gornji, donji, začarani, čudni, vršni i dubinski) i tri "boje" (crvenoj, zelenoj i plavoj).

Zračenje. Energija koju prenose valovi ili čestice.

Recipročna vrijednost. Inverzna vrijednost broja: na primjer, recipročna vrijednost od 3 je 1/3, a recipročna vrijednost od 1/2 je 2.

Relativistička kvantna teorija polja. Kvantnomehanička teorija polja, na primjer *elektromagnetskog polja*, koja uključuje *specijalnu teoriju relativnosti*.

Rezonancija. Jedno od prirodnih stanja titranja fizikalnog sustava.

Riemannova geometrija. Matematički okvir za opisivanje zakrivljenih oblika bilo koje dimenzije. Ima glavnu ulogu u Einsteinovom opisu *prostorvremena* u *općoj teoriji relativnosti.*

Schrödingerova jednadžba. Jednadžba koja upravlja razvojem valova vjerojatnosti u *kvantnoj mehanici.*

Schwarzschildovo rješenje. Rješenje jednadžbi opće teorije relativnosti za sfernu distribuciju materije; jedna implikacija tog rješenja je moguće postojanje *crnih rupa.*

Drugi zakon termodinamike. Zakon prema kojemu se ukupna *entropija* uvijek povećava.

Druga revolucija superstruna. Razdoblje u razvoju *teorije struna*; počinje 1995, kad se počelo razumijevati neke *neperturbacijske* aspekte teorije.

Singularnost. Lokacija na kojoj tkivo *prostorvremena* trpi razorno cijepanje.

Glatki prostor. Područje prostora u kojemu je tkivo prostora rav-

no ili blago zakrivljeno, bez "štipanja", cijepanja i nabora bilo koje vrste.

Inverzni prijelaz s cijepanjem prostora. Vidi inverzni prijelaz.

Prostorvrijeme. Jedinstvo prostora i vremena koje se na početku izvodilo iz *specijalne teorije relativnosti*. Može se smatrati "tkivom" od kojega je oblikovan univerzum; čini dinamičnu arenu u kojoj se odvijaju događaji u univerzumu.

Prostornovremenska pjena. Pjenušav, vijugav, buran karakter tkiva prostorvremena u *ultramikroskopskim* razmjerima, s konvencionalnoga gledišta točkastih čestica; bitan razlog neuskladivosti *kvantne mehanike* i *opće teorije relativnosti* prije *teorije struna*.

Specijalna teorija relativnosti. Einsteinovi zakoni prostora i vremena u odsutnosti gravitacije (vidi i *opća teorija relativnosti*).

Sfera. Vanjska površina kugle. Površina poznate trodimenzionalne kugle ima dvije dimenzije (koje se može označiti dvama brojevima, npr. "širinom" i "dužinom", kao na površini Zemlje). Taj

pojam sfere općenito je primjenjiv na kugle i njihove površine u svakom broju dimenzija. Jednodimenzionalna sfera je stručan naziv za kružnicu. Nuldimenzionalna sfera su dvije točke (kao što je objašnjeno u tekstu). Trodimenzionalnu sferu teže je prikazati; to je površina četverodimenzionalne kugle.

Spin. Kvantnomehanička verzija poznatog nam pojma vrtnje; čestice imaju sebi svojstvenu količinu spina koja je ili cjelobrojna ili izražena polovicom cijeloga broja (kao višekratnik *Planckove konstante*) i nikad se ne mijenja.

Standardni kozmološki model. Teorija velikog praska uz shvaćanje triju negravitacijskih sila u *standardnom modelu fizike čestica*.

Standardni model fizike čestica, standardni model, standardna teorija. Vrlo uspješna teorija triju negravitacijskih sila i njihova djelovanja na materiju. U praktičnom smislu, jedinstvo *kvantne kromodinamike* i *elektroslabe teorije*.

Struna. Fundamentalni jednodimenzionalni objekt; osnovni element *teorije struna*.

Konstanta vezanja struna. (Pozitivan) broj koji određuje koliko je vjerojatno da će se dana *struna* razdvojiti na dvije strune ili da će se dvije strune stopiti u jednu – što su osnovni procesi u *teoriji struna*. Svaka *teorija struna* ima vlastitu konstantu vezanja struna, čiju vrijednost bi se trebalo odrediti jednadžbom; te jednadžbe zasad ne razumijemo dovoljno dobro da bi nam mogle pružiti korisne informacije. Konstanta vezanja manja od 1 znači da se smije primijeniti *perturbacijske metode*.

Mod strune. Moguća konfiguracija (vibracijski obrazac, navijena konfiguracija) koju struna može preuzeti.

Teorija struna. *Ujedinjena teorija* univerzuma koja postulira da osnovni elementi prirode nisu točkaste čestice bez dimenzija nego sićušne jednodimenzionalne niti koje nazivamo *strune*. Teorija struna skladno ujedinjuje *kvantnu mehaniku* i *opću teoriju relativnosti*, kao prethodno poznate zakone malenoga i velikoga koji su inače neuskladivi. Često, i kratica za *teoriju superstruna*.

Jaka sila, jaka nuklearna sila. Najjača od četiri fundamentalne

sile; drži *kvarkove* unutar *protona* i *neutrona* te drži protone i neutrone na okupu u jezgri atoma.

Simetrija jake sile. *Baždarna simetrija* u osnovi *jake sile*, povezana s invarijantnošću fizikalnog sustava na promjene u boji *kvarkova*.

Jako vezanje. Teorija čija je *konstanta vezanja struna* veća od 1.

Dvojnost jakog i slabog. Situacija u kojoj je teorija jakog vezanja *dvojna* s drukčijom teorijom, teorija slabog vezanja – fizikalno identična s njom.

Integrali po stazama. Formulacija *kvantne mehanike* u kojoj se vizualizira da čestice putuju od jedne do druge točke svim mogućim putanjama između njih.

Supergravitacija. Klasa teorija točkastih čestica koje kombiniraju *opću teoriju relativnosti* i *supersimetriju*.

Superpartneri. Čestice čiji se *spin* razlikuje za 1/2 jedinice i sparene su *supersimetrijom*.

Teorija superstruna. *Teorija struna* koja uključuje *supersimetriju*.

Supersimetrična kvantna teorija polja. *Kvantna teorija polja*

Supersimetrična kvantna teorija polja. *Kvantna teorija polja* koja uključuje *supersimetriju*.

Supersimetrični standardni model. Poopćenje *standardnog modela fizike čestica* koje uključuje *supersimetriju*. Implicira udvostručenje broja poznatih vrsta elementarnih čestica.

Supersimetrija. Načelo simetrije koje povezuje svojstva čestica s cjelobrojnim količinom *spina* (*bozoni*) sa svojstvima onih čiji se spin izražava polovicom (neparnog) broja (*fermioni*).

Simetrija. Svojstvo fizikalnog sustava koje se ne mijenja kad se sustav na neki način promijeni. Na primjer, *sfera* je rotacijski simetrična jer joj se izgled ne mijenja kad rotira.

Kršenje simetrije. Smanjenje količine *simetrije* koju sustav ima, obično povezano s *faznim prijelazom*.

Tahion. Čestica čija masa (na kvadrat) je negativna; njezina prisutnost u teoriji obično stvara nekonzistentnosti.

Termodinamika. Zakoni razvijeni u devetnaestom stoljeću koji opisuju aspekte topline, rada, energije, *entropije* i njihov uzajamni razvoj u fizikalnom sustavu.

Trobrana. Vidi *brana*.

Dilatacija vremena. Svojstvo koje se izvodi iz *specijalne teorije relativnosti*, u kojoj se protok vremena usporava za *promatrača* u gibanju.

T.O.E. (theory of everything, teorija svega). Kvantnomehanička teorija koja obuhvaća sve sile i svu materiju.

Topološki različito. Odnosi se na dva oblika koja nikakvom deformacijom ne mogu prijeći jedan u drugi a da se njihova struktura ne pocijepa na neki način.

Topologija. Klasifikacija objekata na grupe koje deformacijom mogu prijeći jedna u drugu bez cijepanja njihove strukture na bilo koji način.

Prijelaz s promjenom topologije. Razvoj tkiva prostora koji uključuje cijepanje te tako mijenja *topologiju* prostora.

Torus. Dvodimenzionalna površina uštipka.

Dvobrana. Vidi *brana*.

Dvodimenzionalna sfera. Vidi *sfera*.

Teorija struna tipa I. Jedna od pet *teorija superstruna*; uključuje i *otvorene* i *zatvorene strune*.

Teorija struna tipa IIA. Jedna od pet *teorija superstruna*; uključuje *zatvorene strune* s *kiralno* simetričnim *vibracijskim obrascima*.

Teorija struna tipa IIB. Jedna od pet *teorija superstruna*; uključuje *zatvorene strune* s *kiralno* asimetričnim *vibracijskim obrascima*.

Ultramikroskopsko. Odnosi se na duljine kraće od *Planckove duljine* (i vremenske razmake kraće od *Planckovog vremena*).

Načelo neodređenosti. Načelo kvantne mehanike koje je otkrio Heisenberg; glasi da postoje svojstva univerzuma, npr. položaj i vektorska brzina čestice, koja nije moguće spoznati s potpunom preciznošću. Ti neodređeni aspekti mikroskopskog svijeta postaju izrazitiji kako se razmjeri udaljenosti i vremena u kojima ih se istražuje sve više smanjuju. Čestice i polja variraju i poprimaju sve moguće vrijednosti u skladu s kvantnom neodređenošću. To naznačuje da je mikroskopsko kraljevstvo nalik burnome moru *kvantnih fluktuacija*.

Ujedinjena teorija, ujedinjena teorija polja. Svaka teorija koja opisuje sve četiri sile i svu materiju u jednom, sveobuhvatnom okviru.

Jednoliko titranje. Ukupno gibanje *strune* u kojem se ona giba bez promjena oblika.

Vektorska brzina. Brzina i smjer gibanja objekta.

Vibracijski mod. Vidi *vibracijski obrazac*.

Vibracijski broj. Cijeli broj koji opisuje energiju *jednolikog titrajnog* gibanja *strune*; energija u njezinom ukupnom gibanju, suprotno onoj koja se povezuje s promjenama u njezinu obliku.

Virtualne čestice. Čestice koje trenutno eruptiraju iz vakuuma; postoje na posuđenoj energiji, u skladu s *načelom neodređenosti*, i brzo se anihiliraju, čime vraćaju posuđenu energiju.

Valna funkcija. Valovi vjerojatnosti na kojima se zasniva *kvantna mehanika*.

Valna duljina. Udaljenost između susjednih vrhova ili dolova vala.

Dvojnost val-čestica. Osnovno svojstvo *kvantne mehanike* da objekti izražavaju i valna i čestična obilježja.

W-bozoni. Vidi slabi baždarni bozon.

Slaba sila, slaba nuklearna sila. Jedna od četiri fundamentalne sile; najpoznatija po tome što posreduje pri radioaktivnom raspadu.

Slabi baždarni bozon. Najmanja grudica *polja slabe sile*; *glasnička čestica slabe sile*; naziva se W-bozon ili Z-bozon.

Slaba baždarna simetrija. *Baždarna simetrija* u osnovi *slabe sile*.

Slabo vezanja. Odnosi se na teoriju čija je *konstanta vezanja struna* manja od 1.

Energija navijanja. Energija utjelovljena u *struni* navijenoj oko kružne *dimenzije* prostora.

Mod navijanja. Konfiguracija *struna* koja se omota oko kružne prostorne *dimenzije*.

Navojni broj. Broj puta koliko je struna navijena oko kružne prostorne *dimenzije*.

Svjetska površina. Dvodimenzionalna površina koju iscrtava *struna* dok se giba.

Crvotočina. Cjevasto područje prostora koje povezuje jedno područje prostora s drugim.

Z-bozon. Vidi slabi baždarni bozon.

Nuldimenzionalna sfera. Vidi *sfera*.

Kazalo

B

Banks, Tom 487
baždarna simetrija 175–178, 480–481, 492
Bekenstein-Hawkingova entropija 426–434
  i potvrda teorije struna 433–435
Bronowski, Jacob 497
brzina 59
  i teorija struna 187–192
  porodice 33
  superpartnerske. *vidi* superpartneri
  u standardnom modelu. *vidi* točkaste čestice

D

dimenzije
  u supergravitaciji 394–400

brzina 39
i efekti specijalne relativnosti 69–71
svjetlosti. *vidi* svjetlost, brzina
brzina svjetlosti. *vidi* svjetlost, brzina

C

Connes, Alain 488
crne rupe 116–119
entropija. *vidi* Bekenstein-Hawkingova entropija
horizont događaja. *vidi* horizont događaja
i teorija struna 411–440

Č

čestice, elementarne
glasničke 174–175
i crne rupe 411–413
u teoriji struna 247–273, 341–361, 486
varijacije. *vidi* uvijene dimenzije, protežne dimenzije
druga revolucija superstruna 480, 490
dvojnost 401–406, 490
i konstante vezanja struna 390–393

E

E=mc2 82–83
Einstein, Albert 89–91, 497. *vidi i* opća teorija relativnosti; fotoelektrični efekt; specijalna teorija relativnosti
eksperiment s dvjema pukotinama 140–145
Feynmanov pristup 153–157
elektromagnetska sila 480, 493

glasničke čestice. *vidi* fotoni
elektromagnetsko polje 485
elektron-neutrini. *vidi* neutrini
elektronski valovi. *vidi* valovi vjerojatnosti
entropija. *vidi i* Bekenstein-Hawkingova entropija
entropija crne rupe 426–434. *vidi i* Bekenstein-Hawkingova entropija

F

Feynman, Richard
alternativna formulacija kvantne mehanike 153–157
Fischler, Willy 487
fizika, kao područje
stvaranje teorija 488–489
tri sukoba 25–26
fizika, klasična. *vidi i* Maxwellova
gravitacijsko polje 485
gravitoni 485
grudice energije, kao energija elektromagnetskog vala. *vidi* kvanti

H

Heisenberg, Werner 512

I

inverzni prijelazi. *vidi i* konifoldni prijelazi

K

koherentno stanje struna 485–486
konačna teorija. *vidi* teorija svega; *vidi* teorija svega (T.O.E.)
konifoldni prijelazi. *vidi i* inverzni prijelazi

elektromagnetska teorija; Newtonova opća teorija gravitacije
fotoni 31–32

G

gibanje. *vidi i* ubrzano gibanje; jednoliko gibanje
  i utjecaj na vrijeme. *vidi* vrijeme, utjecaj gibanja
gibanje bez sila. *vidi* jednoliko gibanje
glasničke čestice 174–177, 492. *vidi i* čestice sila
gravitacijska sila
  u načelu ekvivalencije 481–482
  u Newtonovoj općoj teoriji gravitacije. *vidi* Newtonova opća teorija gravitacije
  u općoj teoriji relativnosti 483
konstanta vezanja struna 387–393
  veličina 378–379
  vrijednosti 390–393
konstantna brzina. *vidi* jednoliko gibanje
kozmologija
  standardni model 443–457
  T.O.E. i spekulacije 494
kozmologija struna 457–475
kvanti 166
kvantna geometrija 301–335
  minimalna veličina 327–329
kvantna mehanika 126–161
  Feymnanova alternativna formulacija 153–156
  nasuprot klasičnoj fizici 157–160
  nasuprot općoj relativnosti 165–183
  preciznost 126–128
  razmjeri 125–161

teorija struna i preformulacija 488–490
univerzum 178–180
kvantna teorija polja 170–173. *vidi i* kvantna kromodinamika; kvantna elektrodinamika; kvantna elektroslaba teorija
kvantno tuneliranje 495
kvarkovi 493

L

Leibniz, Gottfried 484, 491

M

M-teorija 365–406, 479–497. *vidi i* teorija struna
i supergravitacija 394–400
Mach, Ernst 484
materija
nuklearne sile. *vidi* jaka sila; slaba sila
nulte brane 487

O

opća teorija relativnosti 85–122, 485
nasuprot kvantnoj mehanici 165–185, 208
princip ekvivalencije. *vidi* princip ekvivalencije
provjera eksperimentima 113–116
uvijanje prostorvremena 85, 96–113

P

parovi virtualnih struna 489
perturbacijska teorija. *vidi* račun smetnji

sastav 27–30

N

n.p.. *vidi* nakon praska (n.p.)
naboji sila 31–33
načelo ekvivalencije. *vidi* princip ekvivalencije
načelo neodređenosti 166–168
načelo relativnosti 52–56
navijene strune. *vidi* omotane strune
nejednoliko gibanje. *vidi* ubrzano gibanje
nekomutativna geometrija 488
nenavijene strune. *vidi* neomotane strune
Newton, Isaac 484, 489
Newtonova opća teorija gravitacije
  specijalna teorija relativnosti 87–88
petlje struna 489, 496
Planckova duljina 487
Planckovo vrijeme. *vidi i* inflacijska kozmologija; standardni kozmološki model; kozmologija struna
prijelazi s promjenom topologije. *vidi* konifoldni prijelazi; inverzni prijelazi
princip ekvivalencije 481–482, 491–492
  i simetrija 480–481
prosječni životni vijek i utjecaj gibanja na vrijeme 69–71
prostor
  tkivo. *vidi* prostorvrijeme
prostorvrijeme
  priroda prostorvremena 483–487
  teorija struna i priroda prostor-

vremena 485–488
u općoj teoriji relativnosti. *vidi* opća teorija relativnosti; uvijanje prostora
u specijalnoj teoriji relativnosti 483–484
uvijanje. *vidi* prostorvrijeme, uvijanje
prostorvrijeme, cijepanje 341–361
prostorvrijeme, uvijanje
u općoj teoriji relativnosti 96–111
protežne dimenzije
u M-teoriji 487–488

R

razmjeri
u kvantnoj mehanici 125–161, 178–181
u općoj teoriji relativnosti
i simetrije 175–177
simetrija. *vidi i* supersimetrija
baždarna 480–481, 492
specijalna teorija relativnosti 507
brzina svjetlosti 56–62
promatrači u jednolikom gibanju 47
prostorvrijeme 483–484
suprotna intuiciji 49–51
u kvantnoj teoriji polja 170–172
spin
elementarnih čestica 230–234
standardni model fizike čestica 489
elementarne čestice. *vidi* točkaste čestice
strune
koherentno stanje 485–486
rezonantni modeli titranja

178–181
u teoriji struna 189–190, 200–203, 487
relativistička kvantna teorija polja. *vidi* kvantna teorija polja
rezonantni vibracijski obrasci, rezonantni modeli titranja
struna 485–486

S

satovi, svjetlosni. *vidi* svjetlosni satovi
sfere
jednodimenzionalne. *vidi* kružnice
Shenker, Stephen 487
sile, fundamentalne 31–34
glasničke čestice sila. *vidi* glasničke čestice
311–320, 485–486
Sunce
pomrčine. *vidi* pomrčine Sunca
superpartneri 492
supersimetrična teorija struna. *vidi* teorija superstruna
supersimetrija
i superpartneri 232–235, 291–292
Susskind, Leonard 487
svemir 23–25
ekspanzija i kontrakcija. *vidi* veliki prasak; veliko sažimanje
mikroskopska svojstva. *vidi* razmjeri, u kvantnoj mehanici; razmjeri, u teoriji struna
porijeklo 443–475
svjetlosni valovi. *vidi* elektromagnetski valovi

svjetlost. *vidi i* elektromagnetski valovi
svjetlost, brzina
specijalna teorija relativnosti 56–63
u formuli E=mc2 82–83

T

tip IIA, teorija struna 370, 371
tip IIB, teorija struna 370, 371
T.O.E.. *vidi* teorija svega
teorija struna. *vidi i* M-teorija; kozmologija struna; teorija superstruna
budućnost 479–497
crne rupe 411–440
dimenzije 247–274
dvojnost 401–405
elementarne čestice 187–194
glazbene metafore 187, 200
gravitacijska sila 394–400
467–474, 494
odstupanja od neizbježnosti 365–367
teorija struna kao konačna teorija 37–38, 200–201
točka. *vidi i* točkaste čestice
točkaste čestice. *vidi i* čestice, elementarne

U

ubrzivači čestica. *vidi* akceleratori čestica
univerzum. *vidi* svemir
uvijene dimenzije. *vidi i* Calabi-Yauovi prostori
i supergravitacija 394–400

V

Vafa, Cumrun 491
valna amplituda. *vidi* amplituda

gravitacijska sila 394–400
kao konačna teorija 37–39, 200–201
kozmologija. *vidi* kozmologija struna
matematika. *vidi i* kvantna geometrija
nasuprot standardnom kozmološkom modelu 457
petlje struna. *vidi* strune
razmjeri 203–206, 272–275, 327–329, 487–488
supersimetrija. *vidi* teorija superstruna; supersimetrija
veliko sažimanje 327–329
teorija superstruna 187–221, 479, 496. *vidi i* M-teorija; teorija struna
nastanak 187
teorija svega (T.O.E.)
kozmološke spekulacije
vala
valne funkcije. *vidi* valovi vjerojatnosti
valovi
svjetlosni. *vidi* elektromagnetski valovi
valovi vjerojatnosti 149–154
Veliki hadronski sudarač 493
veliki prasak 116
Veneziano, Gabriele 482
vjerojatnost
i valna priroda materije. *vidi* valovi vjerojatnosti
vrijeme, učinak gibanja
ljudski životni vijek 69–71
mjereno svjetlosnim satovima 64–68
uvijanje vremena. *vidi* opća teorija relativnosti; prostor-vrijeme; uvijanje

W

W-bozon. *vidi i* slabi baždarni bozoni
Witten, Edward 479, 487, 491
  inverzni prijelazi u teoriji struna 359–362

Z

Z-bozon. *vidi i* slabi baždarni bozoni
zakrivljenost prostorvremena. *vidi* prostorvrijeme, uvijanje
Zemlja 495

BRIAN GREENE

ELEGANTNI SVEMIR

Fizičari i matematičari diljem svijeta danas gorljivo rade na jednoj od najambicioznijih ikad iznesenih teorija: teoriji struna. Teorija struna je ključ za pronalaženje jedinstvene teorije polja koja je Einsteinu izmicala punih trideset godina. Konačno, znanost prekoračuje stoljetni procijep između zakona velikog – opće relativnosti – i zakona malog, kvantne mehanike. Teorija struna elegantno objedinjuje ta dva stupa moderne fizike u jedinstvenu, harmoničnu cjelinu ustvrdivši da svi čudesni događaji u svemiru nastaju iz jednog jedinog fenomena: vibracija mikroskopski malenih vitica energije duboko u srcu svake tvari.

Knjiga Briana Greenea je vrhunac znanstvenog pisanja. Možda više od bilo ko-

Knjiga Briana Greenea je vrhunac znanstvenog pisanja. Možda više od bilo kojeg drugog popularnoznanstvenog rada, ova knjiga ljušti sloj po sloj pojedinosti i postupno otkriva čudesnu bit suvremene fizike. S rijetkom kombinacijom znanstvenog poštenja i književnog dara, autor nas vodi kroz najnovije rezultate istraživača konačne teorije svemira.

— Shing-Tung Yau, dobitnik Fieldsove nagrade za matematiku

Brian Greene nam donosi izvanredno zgodan prikaz teorije struna – teorije koja, čini se, predstavlja najvjerojatniji put ka konačnoj teoriji svega. Njegova knjiga napisana je jasno i jednostavno a ipak znalački. Tu kompliciranu teoriju ova knjiga čini veoma pristupačnom neznanstvenicima, a stručnjacima će biti iznimno slasno štivo.

— David M. Lee, dobitnik Nobelove nagrade za fiziku

Svatko koga zanimaju horizonti teorijske fizike – povijesni, sadašnji i budući – s velikim će užitkom čitati ovu knjigu.

— Edward Witten, Sveučilište Princeton